



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil  
2012

**David Policarpo  
Lourenço**

**Avaliação do risco sísmico em Portugal**





**David Policarpo  
Lourenço**

## **Avaliação do risco sísmico em Portugal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Humberto Varum, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica da Doutora Helen Crowley, Investigadora do EUCENTRE em Pavia, Itália.



## **o júri**

presidente

Prof.<sup>a</sup> Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, professora auxiliar,  
Universidade de Aveiro

Prof.º Doutor Daniel Vitorino de Castro Oliveira, professor associado,  
Universidade do Minho

Prof.º Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, professor associado com  
agregação, Universidade de Aveiro

Doutora Helen Marie Crowley, Investigadora, Eucentre Foundation – European  
Centre for Training and Research in Earthquake Engineering



Gostaria de expressar aqui a minha profunda gratidão a todos os que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Contudo, agradeço especialmente:

Ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Varum, por toda a sua paciência, disponibilidade e apoio que sempre me prestou e pela prontidão com que sempre se apresentou na resolução de qualquer problema.

À minha coorientadora, Doutora Helen Crowley, que apesar de distante sempre me apoiou e motivou da melhor forma possível no decorrer deste projeto.

Ao Engenheiro Vitor Silva por todo o tempo e paciência despendidos, auxílio na utilização do OpenQuake e a sua pronta e competente ajuda na resolução dos diversos problemas que surgiram.

À equipa do Global Earthquake Model pelo apoio técnico e científico prestado na utilização do software OpenQuake.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro por todas as condições que disponibilizou a mim e a todos os meus colegas.

A todas as instituições, Privadas ou Públicas, que se mostraram disponíveis a receber-me nas suas instalações e facultaram os dados necessários à resolução deste trabalho, designadamente:

- À Câmara Municipal de Aveiro, nomeadamente à Arq.<sup>a</sup> Emília Lima;
- À Câmara Municipal de Gaia, nomeadamente à Eng.<sup>a</sup> Susana Paulino;
- À Câmara Municipal da Póvoa de Varzim, nomeadamente ao Eng.º Rui Pimpão;
- À Câmara Municipal de Bragança, nomeadamente ao Eng.º João Praça;
- À Câmara Municipal de Loures, nomeadamente ao Eng.º Paulo Bravo e a Eng.<sup>a</sup> Ana Ferreira;
- À Câmara Municipal de Évora, nomeadamente à Coordenadora Clara Serralha;
- À Câmara Municipal de Setúbal, nomeadamente à Arq.<sup>a</sup> Teresa Megre;
- Ao Gabinete de Engenharia Civil Imoplano, nomeadamente ao Eng.º Jorge Ramos;
- Ao Gabinete de Engenharia Civil Civi4, nomeadamente ao Eng.º Jorge Figueiredo;
- Ao Gabinete de Engenharia Civil HDP, nomeadamente ao Eng.º Paulo Fidalgo.

A todos os meus amigos que me ajudaram no decorrer deste trabalho, mas especialmente por todos os momentos de felicidade que me proporcionaram durante os últimos 5 anos, tempos que já mais esquecerei, em especial ao Rui Martins, Filipe Soares, Izidro Alves, Maria Matos, Filipa Rodrigues, Beatriz Martins, Alexandre Peralta, Tiago Fialho, Ana Mendes.

Por último agradeço aos meus pais, irmãos, familiares e namorada por todo o carinho, paciência, compreensão e apoio sempre demonstrado pois foram e continuarão a ser um apoio importante no meu percurso de vida.

## **agradecimentos**





**palavras-chave**

Perigosidade, vulnerabilidade, exposição, risco sísmico

**resumo**

O grande objectivo deste trabalho é a avaliação do risco sísmico em Portugal continental. Apesar dos vários trabalhos que se têm desenvolvido nesta área ao longo dos anos, a evolução do parque habitacional e o aprofundamento do conhecimento relativamente à sismicidade, obrigam ao constante estudo do risco sísmico em Portugal. Desta forma, é absolutamente necessário que trabalhos, tal como este, continuem a ser desenvolvidos. Este trabalho em particular conta com a utilização do recentemente desenvolvido software OpenQuake, para o cálculo do risco sísmico.

O risco sísmico é a conjugação de três factores: a perigosidade, a exposição e a vulnerabilidade. Como tal, cada um destes três elementos foram estudados e debatidos, com principal foco para os dois últimos. Como este trabalho se debruça sobretudo na exposição e vulnerabilidade, os modelos de perigosidade foram adoptados de outro autor, considerando apenas algumas atualizações, de forma a criar mapas de perigosidade mais atuais.

Os modelos de exposição foram desenvolvidos com base nos inventários existentes do parque habitacional nacional, que surgiram a partir dos CENSOS 2001 e 2011, de forma a desenvolver mapas de exposição do país. Avaliam-se ainda as propriedades geométricas das estruturas de betão armado, que se constituem atualmente como a principal tipologia em Portugal.

O modelo de vulnerabilidade sísmica para estruturas de betão armado foi desenvolvido a partir da informação recolhida sobre esta tipologia construtiva recorrendo a um método analítico simplificado não-linear recentemente desenvolvido. Para as outras tipologias foram considerados modelos de vulnerabilidade disponíveis na literatura.

Uma vez determinadas todas as componentes necessárias, foi então avaliado o risco sísmico à escala nacional, que tem como resultado mapas e curvas de perdas económicas.



**keywords**

Hazard, vulnerability, exposure, seismic risk

**abstract**

The main objective of this thesis is the seismic risk assessment of mainland Portugal. Despite the existence of several studies in this area carried out in the last years, the evolution of the Portuguese building stock and the improvements of the knowledge about the local seismicity, demand the continuous revision of the seismic risk. Thus, endeavours similar to the one presented herein should be continuously developed. This specific work uses a recent software called OpenQuake for the seismic risk calculations.

Seismic risk is the conjugation of three factors: hazard, exposure and vulnerability. As such, each one of these three elements has been studied and discussed, giving more emphasis to the last two. For this reason, a hazard model was adopted from the literature, considering a few improvements, in order to produce up-to-date hazard maps.

An exposure model was developed based on data from the Portuguese housing CENSOS of 2001 and 2011. Regarding the reinforced concrete typologies, a campaign was carried out with the purpose of analysing tens of blueprints, to model the probabilistic distributions of a set of geometric parameters.

A vulnerability model was developed for the reinforced concrete typologies, using a recent analytic simplified nonlinear methodology. In order to do so, information about the geometric parameters collected previously were used. For all the remaining building typologies, fragility models available in the literature were employed.

Once determined all the necessary components, the associated seismic risk for Portugal was estimated, resulting in a set of loss maps and curves of the economic value of the building stock.







# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Risco sísmico.....	2
1.2.1. Conceitos gerais.....	2
1.2.2. Estudos anteriores.....	3
1.3. Motivação.....	5
1.4. Objectivos.....	6
1.5. Organização.....	6
2. Perigosidade sísmica.....	9
2.1. Modelo de perigosidade sísmica .....	10
2.2. Leis de atenuação .....	11
2.3. Resultados .....	13
2.3.1. Mapas de perigosidade .....	13
2.3.2. Curvas de perigosidade sísmica.....	14
2.3.3. Discussão dos resultados .....	14
3. Exposição.....	15
3.1. Parque habitacional português .....	15
3.2. Desenvolvimento do modelo de exposição.....	18
3.2.1. Catalogação do parque habitacional português .....	20
3.2.2. Cálculo do valor económico .....	21
3.2.3. Distribuição espacial do valor económico.....	24
3.2.4. Limitações e simplificações.....	25
3.3. Propriedades geométricas do parque habitacional português .....	26
3.3.1. Determinação das propriedades geométricas .....	27
3.3.2. Discussão de resultados .....	30
3.4. Propriedades materiais do parque habitacional português .....	30
4. Vulnerabilidade.....	33
4.1. Determinação das curvas de fragilidade.....	33
4.2. Determinação das curvas de vulnerabilidade .....	35

4.3. Resultados .....	35
5. Avaliação do risco sísmico .....	37
5.1. Curvas de perdas económicas .....	37
5.2. Mapas de perdas económicas .....	39
5.3. Desagregação de perdas .....	40
6. Conclusões e futuros desenvolvimentos .....	43
6.1. Conclusões .....	43
6.2. Desenvolvimentos futuros .....	46
7. Referências .....	47
7.1. Referências bibliográficas .....	47
7.2. Referências webgráficas .....	50



## Índice de Figuras

Figura 1 - Perdas económicas para os períodos de retorno de 475 e 975 anos [Sousa, 2006] .....	5
Figura 2 - Zonamento sísmico SA (esquerda) e SB (direita) proposto por Vilanova e Fonseca [2007].....	10
Figura 3 - Diagrama lógico considerado para os cálculos da perigosidade e risco sísmico	11
Figura 4 - Mapa de perigosidade da mediana [PGA] .....	13
Figura 5 - Mapa de perigosidade para o percentil 16 (esquerda) e para o percentil 84 (direita) [PGA].....	13
Figura 6 - Curvas de perigosidade para algumas das principais cidades de Portugal .....	14
Figura 7 - Percentagem de edifícios por tipo de estrutura [Carvalho <i>et al.</i> , 2001].....	17
Figura 8 - Percentagem de edifícios por época de construção [Carvalho <i>et al.</i> , 2001] .....	17
Figura 9 - Percentagem de edifícios de acordo com o número de pisos [Carvalho <i>et al.</i> , 2001] .....	18
Figura 10 - Distribuição do parque habitacional português de acordo com a época de construção, tipo de construção e número de pisos [Carvalho <i>et al.</i> , 2001] .....	18
Figura 11 - Extrapolação da percentagem de edifícios de betão armado em 2011 para a zona Norte.....	19
Figura 12 - Número de fogos por edifício de acordo com o número de pisos .....	22
Figura 13 - Número de edifícios por classe construtiva .....	23
Figura 14 - Valor económico por classe construtiva .....	23
Figura 15 - Valor económico por tipos de construção.....	24
Figura 16 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) dos edifícios de betão armado (esquerda) e de alvenaria argamassada com placa (direita).....	24
Figura 17 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) dos edifícios de alvenaria argamassada sem placa (esquerda) e de alvenaria de taipa, adobe e pedra solta (direita).....	25
Figura 18 - Representação dos distritos (a sombreado) onde projetos de estabilidade e arquitetura foram consultados.....	27
Figura 19 - Histograma com distribuição do vão médio das vigas e respetivas curvas de distribuição probabilísticas consideradas .....	29
Figura 20 - Relação entre o vão e a altura das vigas .....	29
Figura 21 - Curvas de fragilidade para a classe de edifícios RC_MR_LC.....	34
Figura 22 - Curvas de vulnerabilidade para estruturas em betão armado .....	36
Figura 23 - Curvas de perda económica para Faro (esquerda) e Lisboa (direita) .....	38
Figura 24 - Curvas de perda económica para Aveiro (esquerda) e Porto (direita).....	38
Figura 25 - Comparação das curvas de perda económica .....	38

Figura 26 - Mapa de perdas económicas relativas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos para betão armado (esquerda) e alvenaria argamassada com placa (direita) .....	39
Figura 27 - Mapa de perdas económicas relativas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos para alvenaria argamassada sem placa (esquerda) e alvenaria de taipa, adobe e pedra solta (direita) .....	40
Figura 28 - Valor económico de perdas por categoria construtiva para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos .....	40
Figura 29 - Percentagem de perdas económicas por categoria construtiva para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos .....	41
Figura 30 – Mapa de perigosidade obtido, de Montilla e Cansado [2002] e do RSA [1983], respetivamente .....	44
Figura 31 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) total do edificado (esquerda) e mapa de densidade do valor económico (direita).....	44
Figura 32 - Mapa de perdas económicas (em milhares de euros) totais absolutas (esquerda) e relativas (direita) para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.....	45

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resumo dos modelos de atenuação .....	12
Tabela 2 - Categorias consideradas na catalogação do parque habitacional português .....	16
Tabela 3 - Classificação das em betão armado .....	20
Tabela 4 - Classificação das tipologias de edifícios de paredes de alvenaria argamassada sem placa e ATAPS .....	21
Tabela 5 - Custo médio por metro quadrado .....	21
Tabela 6 - Área média por fogo ara cada zona de atuação da CCDR .....	22
Tabela 7 - Cálculo do valor económico de edifícios do tipo RC_LR_HC para o concelho de Aveiro. ....	23
Tabela 8 - Quadro resumo das características geométricas .....	28
Tabela 9 - Propriedades dos materiais [Bal <i>et al.</i> , 2008] .....	31
Tabela 10 - Resultados das curvas de fragilidade para as classes de betão armado .....	34
Tabela 11 - Modelos de fragilidade considerados para ACP, ASP, A, TP e RS .....	36



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Em 2011 celebrou-se o nascimento do ser humano 7 000 000 000. Em 2025 estima-se que a população mundial crescerá até aos 8,1 mil milhões e em 2050 atingirá cerca de 9,4 mil milhões [PRB, 2010]. Este crescimento descontrolado da população tem conduzido ao aumento de grandes centros urbanos em locais propícios a desastres naturais, o que se tem refletido em nefastas perdas humanas e económicas. Portugal não é imune a este fenómeno e tem o seu passado marcado pela ocorrência de desastres naturais como sismos, tsunamis ou cheias. Apesar do nosso conhecimento sobre a vulnerabilidade estrutural e perigosidade sísmica ser cada vez mais profundo, continua-se a assistir nos dias de hoje a grandes catástrofes devido a estes fenómenos, como foi o caso do sismo do Haiti em Janeiro de 2010 ou da China em Abril do mesmo ano. Uma das causas para tais acontecimentos é o fraco controlo da qualidade da construção e a falta de regulamentação do desenvolvimento urbano. Para que tais medidas possam ser tomadas, é necessário que se compreenda o risco sísmico da região. Posteriormente, podem ser definidas medidas de mitigação do risco sísmico que podem passar pela implementação de códigos de construção mais rigorosos, proibição da construção em zonas com grande atividade sísmica ou criação de planos de emergência [Spence, 2004].

O risco sísmico depende essencialmente de três variáveis: perigosidade sísmica, vulnerabilidade estrutural e exposição. Através da conjugação destas três grandezas, é possível compreender o quanto um edifício, uma cidade ou até mesmo um país está sujeito aos efeitos da ação sísmica. A vulnerabilidade estrutural assume especial importância, não só por refletir diretamente a susceptibilidade de um dado edifício sofrer dano quando sujeito à ação sísmica, mas porque intervindo com adequadas soluções de reforço sísmico pode ser possível reduzir significativamente a vulnerabilidade, e consequentemente o respectivo risco sísmico [Vicente, 2008].

Em Portugal, o parque habitacional tem vindo a sofrer alterações significativas ao longo dos anos, tanto no que diz respeito ao tipo de construção, como nas técnicas de construção utilizadas [Carvalho *et al.*, 2001]. Esta evolução tem naturalmente um impacto direto na vulnerabilidade do edificado, o que torna necessário compreender de que modo o risco sísmico é afetado.

De acordo com Sousa [2006], os conhecimentos sobre a perigosidade sísmica atual do país, aliada à existência de construção não dimensionada para resistir a sismos, indicam que parte da população vive em situações de risco sísmico considerável, por vezes, desconhecendo completamente o perigo a que está sujeita.

Com este trabalho, pretende-se essencialmente sistematizar o conhecimento sobre as características estruturais dos edifícios de betão armado de diferentes épocas em Portugal, de forma que a vulnerabilidade estrutural possa ser estimada. A vulnerabilidade do edificado será representada através de curvas de vulnerabilidade, que serão posteriormente utilizadas para o cálculo do risco sísmico a nível nacional. Pretende-se ainda que os resultados deste trabalho não só forneçam uma atualização da situação do risco sísmico em Portugal, como também contribuam para futuros estudos que visem a determinação de perdas humanas ou económicas devido a estes fenómenos.

## 1.2. Risco sísmico

### 1.2.1. Conceitos gerais

O **risco sísmico** pode ser interpretado como uma medida do potencial de perda, como nível de destruição ou dano, devido à ocorrência de um dado evento sísmico [Vicente, 2008]. De uma forma geral, o risco sísmico pode ser estimado através da convolução de três componentes:

**Perigosidade:** trata-se da probabilidade de se exceder um determinado nível de movimento do solo devido a eventos sísmicos, em um dado local;

**Vulnerabilidade:** trata-se da probabilidade de um dado elemento sofrer danos quando sujeito à ação sísmica;

**Exposição:** trata-se do valor (económico ou humano) dos elementos expostos à ação sísmica.

O cálculo do risco sísmico para uma dada região é fundamental para que sejam tomadas as devidas medidas de mitigação do mesmo. Esta redução do risco sísmico pode ser concebida através do melhoramento da capacidade de resposta dos edifícios aplicando soluções de reforços sísmico, ou através da imposição de códigos de construção mais rigorosos (diminuição da vulnerabilidade). Por vezes, a redução do risco sísmico pode também ser

realizada evitando a construção em locais de grande atividades sísmica (diminuição da exposição).

O reconhecimento da importância do cálculo do risco sísmico no processo de redução de perdas humanas e económicas devido a sismos, tem desencadeado imensos estudos e projetos com diferentes escalas por todo o mundo. Com o objectivo de compreender de que forma é que estes estudos podem contribuir para o melhoramento do trabalho proposto nesta dissertação, foi feita uma recolha dos trabalhos mais recentes, e os resultados considerados mais significativos são apresentados na próxima secção.

### 1.2.2. Estudos anteriores

As grandes perdas humanas provocadas pelos sismos na Roménia (1977) e na Ex-Jugoslávia (1979), incentivaram o desenvolvimento de vários estudos e projetos na década de 80, na área da mitigação do risco sísmico [Vicente, 2008]. Mais tarde, o período de 1990 a 1999 foi decretado pelas Nações Unidas como a Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais. Os estudos que têm vindo a ser elaborados até aos dias de hoje, foram desenvolvidos considerando diferentes regiões, isto é, desde continentes, a apenas algumas cidades. Neste trabalho, os projetos que foram analisados serão apresentados de acordo com a escala do estudo, do mais global, até aos de carácter mais regional.

Uma das primeiras iniciativas para o aprofundamento do conhecimento da ação sísmica em todo o mundo, foi o Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). Este projeto iniciou-se em 1992 e teve como principal objectivo a criação de modelos de perigosidade sísmica para todas as regiões no mundo. O GSHAP foi concluído em 1999 com a publicação de um mapa global da aceleração de pico do solo para um período de retorno de 475 anos [Giardini, 1999]. Mais recentemente, iniciou-se outro projeto denominado Global Earthquake Model (GEM), que cobre não só a perigosidade sísmica, como também a vulnerabilidade e exposição a nível global. Esta iniciativa teve início em 2009 e pretende facilitar a colaboração entre diversas instituições e especialistas nas diferentes áreas do risco sísmico, de forma clara e transparente [Pinho, 2010]. Um dos produtos deste projeto é a criação de uma plataforma opensource para o cálculo de perdas devido a sismos, denominada OpenQuake [1]. A conclusão deste projeto está prevista para 2013, com a publicação do primeiro mapa de risco sísmico à escala global.

No que diz respeito a estudos à escala europeia, podem-se distinguir três iniciativas atualmente em desenvolvimento, incidindo cada uma delas numa das componentes do risco

sísmico. O projeto SHARE (2009-2012) [2], tem como principal objectivo o desenvolvimento de uma análise probabilística da perigosidade sísmica em toda a Europa, através da criação de um modelo de perigosidade regionalmente homogéneo e da seleção de leis de atenuação apropriadas a cada zona sismogénica. Em paralelo, encontra-se também em desenvolvimento o projeto Syner-G (2009-2012) [3], que trata-se de uma iniciativa que visa a criação de modelos de fragilidade para edifícios, infraestruturas e redes, assim como a definição de uma metodologia unificada para a avaliação da vulnerabilidade física e socioeconómica dos elementos em risco. Por último, encontra-se a decorrer o NERA (2010-2014) [4], que visa a partilha de informação e colaboração de várias entidades das diferentes áreas do risco sísmico.

No âmbito do trabalho desta dissertação, tem especial importância uma das componentes deste projeto que consiste na classificação e criação de um inventário de edifícios para toda a Europa. Pode-se ainda destacar os projetos RISK-UE (2001-2004) e LESSLOSS (2004-2007) ambos já concluídos. Nestas iniciativas, a perigosidade e vulnerabilidade sísmica de várias cidades europeias (incluindo Lisboa) foram avaliadas, e os respectivos resultados foram usados para o cálculo do risco sísmico. Estes projetos tiveram a particularidade do envolvimento de entidades tanto públicas como privadas, que permitiram a definição de estratégias para mitigação do risco sísmico, tendo em consideração as características específicas de cada cidade [Mouroux e Brun, 2006; Spence, 2007].

Reduzindo a escala a Portugal, também já existem alguns estudos no âmbito da perigosidade e risco sísmico como é o caso de Vilanova e Fonseca [2007] e de Sousa [2006]. No primeiro estudo, realizou-se um estudo da perigosidade sísmica em Portugal baseando-se numa abordagem segundo uma árvore de decisão, em que cada ramo de decisão utiliza diferentes parâmetros, como por exemplo, três modelos de atenuação da intensidade sísmica, dois zonamentos da sismicidade distintos e dois catálogos de sismos. Desta forma, foi possível obter um mapa da perigosidade média com 10% de probabilidade de excedência num período de 50 anos. Em Sousa [2006], é feita uma análise do risco sísmico a nível nacional. Este trabalho teve a singularidade de usar informação dos CENSOS 2001 que possibilita o cálculo de perdas para cada uma das freguesias, de usar várias metodologias no cálculo da vulnerabilidade (desde métodos mecanicistas a métodos estatísticos/empíricos), e a utilização do software de cálculo de perdas desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, denominado LNECloss. Como resultados, este trabalho apresentou mapas das perdas económicas e humanas para cenários de sismos históricos semelhantes aos de 1909 e 1755, assim como mapas de risco sísmico para diferentes períodos de retorno, ilustrados na



Figura 1. Estes últimos mapas referidos têm especial importância para este estudo, já que o cálculo deste tipo de resultados é um dos objectivos deste trabalho.

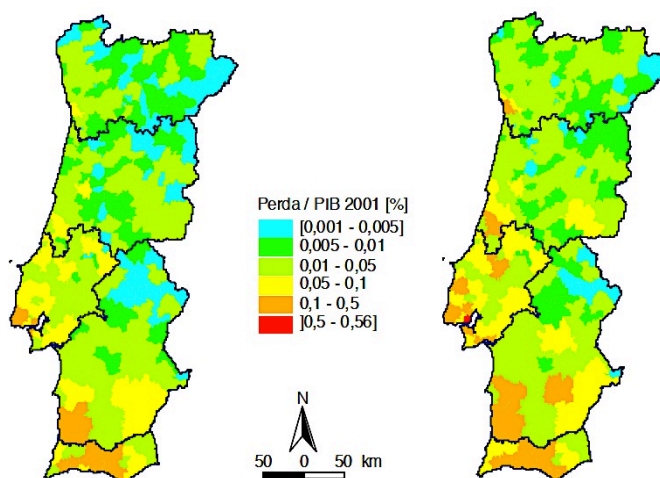


Figura 1 - Perdas económicas para os períodos de retorno de 475 e 975 anos [Sousa, 2006]

Ao fazer uma redução ainda maior na escala de estudo, existem diversos trabalhos para várias regiões do país dos quais se destacaram os de Lisboa [Campos-Costa *et al.*, 2006; Azevedo *et al.*, 2009], de Algarve [Ferreira *et al.*, 2010; Sousa *et al.*, 2010], de Coimbra [Vicente, 2008], de Aveiro [Ferreira, 2008; Costa, 2008]. O facto de estes projetos englobarem uma pequena área de estudo permitiu que fosse possível uma pesquisa mais exaustiva das propriedades das estruturas em estudo, o que confere uma maior representatividade aos resultados.

Existem ainda alguns estudos Rodrigues [2009] e Martins [2011] que não se focaram propriamente numa região, mas que no entanto contêm informação importante sobre o edificado português, e que por esta razão também foram considerados neste estudo.

### 1.3. Motivação

Tendo em consideração a constante dinâmica do parque habitacional de Portugal, entende-se que é necessário avaliar o risco sísmico em Portugal periodicamente, de forma a compreender de que forma é que este fenómeno evolui. De modo a que o cálculo de perdas humanas e económicas seja cada vez melhor, é fundamental o aprofundamento do conhecimento sobre as características do Parque Habitacional Português. Neste trabalho, pretende-se contribuir significativamente nesta área, através do estudo detalhado das características geométricas e materiais dos elementos estruturais de edifícios em betão armado.

A ocorrência de novos eventos sísmicos permite o melhoramento dos modelos de perigosidade e leis de atenuação da intensidade sísmica. Neste trabalho, pretende-se usar um

modelo de perigosidade sísmica recente e novas leis de atenuação no cálculo do risco sísmico a nível nacional, fornecendo assim uma atualização da situação deste problema em Portugal.

## **1.4. Objectivos**

Para a obtenção de todos os resultados pretendidos será necessário inicialmente realizar-se um estudo sobre a distribuição das diferentes tipologias de edifícios em Portugal. Seguidamente, para os edifícios de betão armado, será realizada a análise de uma amostra significativa de projetos de estabilidade e arquitetura, que permitirá o cálculo das distribuições probabilísticas das propriedades geométricas dos elementos estruturais. Estes resultados serão usados para a derivação de curvas de fragilidade, através da aplicação de um método analítico simplificado não-linear.

Relativamente à perigosidade sísmica, pretende-se testar um modelo de perigosidade sísmica proposto recentemente para Portugal, e consequente, determinar mapas de perigosidade para probabilidades de excedência 10% em 50 anos (nível que corresponde ao comum período de retorno geralmente usado para a avaliação da perigosidade e risco sísmico), bem como curvas de perigosidade sísmica.

Os diferentes modelos serão introduzidos no software opensource de cálculo de risco sísmico, para que possa ser possível a determinação de mapas de risco sísmico para a mesma probabilidade de excedência.

## **1.5. Organização**

Esta dissertação divide-se em quatro capítulos principais, sendo o Capítulo 5 fruto do trabalho desenvolvido nos Capítulos 2, 3 e 4.

No Capítulo 2, é desenvolvido um estudo sobre a perigosidade sísmica em Portugal. São apresentados alguns modelos de perigosidade e o mais recente é avaliado na Secção 2.1. Seguidamente, foi feita uma recolha de possíveis leis de atenuação aplicáveis ao território nacional, e é proposto um diagrama lógico para os cálculos. Apesar da importância inegável da perigosidade no estudo do risco sísmico, esta temática não se trata do principal foco deste trabalho e consequentemente, foi decidido usar-se um modelo da literatura que satisfizesse as necessidades deste trabalho. Deste modo, são apresentadas curvas e mapas de perigosidade.

Relativamente ao Capítulo 3, onde terá lugar o estudo dos elementos de exposição do país, é apresentada uma descrição do parque habitacional português, com base em informação dos CENSOS 2001, da responsabilidade do Instituto Nacional de Estatística (INE). Na

Secção 3.2 é desenvolvido um modelo de exposição sísmica, onde se estima o valor económico do edificado habitacional até à data do preenchimento dos CENSOS 2011. Finalmente, na Secção 3.3, são descritas as propriedades geométricas de edifícios de betão armado e são propostas distribuições probabilísticas para a sua modelação.

No Capítulo 4, desenvolveu-se um modelo de vulnerabilidade sísmica para edifícios de betão armado. Na Secção 4.1, é feita uma descrição da metodologia de determinação das curvas de fragilidade, segundo um processo simplificado desenvolvido por Silva *et al.* [2012\_c], enquanto que no Capítulo 4.2, é demonstrado o método escolhido para a conversão das curvas de fragilidade, em curvas de vulnerabilidade. Ainda neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica de curvas de fragilidade para as restantes tipologias.

O Capítulo 5 é o culminar desta dissertação, apresentando-se a avaliação do risco sísmico de Portugal. Considerando os resultados dos capítulos anteriores, na Secção 5.1, é calculado curvas de perda probabilísticas e na Secção 5.2, apresentam-se mapas de Portugal para perdas económicas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

Por fim, no Capítulo 6 serão debatidas as conclusões retiradas desta dissertação, apresentando-se na Secção 6.1, desenvolvimentos futuros que poderão completar e aperfeiçoar o trabalho aqui desenvolvido.



## 2. PERIGOSIDADE SÍSMICA

Perigosidade sísmica pode ser entendida como a probabilidade de se exceder um determinado nível de movimento do solo devido a eventos sísmicos, em um dado local. Como tal, é importante identificar o tipo de solo da área em estudo e a sua localização de modo a chegar a resultados o mais próximo da realidade possíveis.

A grande parte dos sismos têm como origem o movimento das placas tectónicas, fenómeno esse que liberta uma enorme quantidade de energia que se dissipa ao longo das placas através da criação de vibrações. Os sismos, consoante a sua intensidade, poderão ter efeitos muito nefastos para o Homem, podendo arruinar cidades por completo.

Portugal encontra-se próximo de um encontro de três placas tectónicas, a placa norte americana, a placa africana e a placa euro-asiática, sendo que a união das duas últimas referidas passa a poucos quilómetros do sul de Portugal, colocando assim o país numa zona de considerável atividade sísmica. A situação de Portugal torna-se mais preocupante pois é nas zonas litorais onde se registam juntamente as maiores concentrações de população e se apresentam valores mais elevados de intensidade sísmica.

Apesar de os grandes eventos sísmicos se encontrarem normalmente muito espaçados no tempo, Portugal é diariamente abalado por sismos, sendo que na grande parte das vezes de magnitude tão reduzida que não são sentidos. Contudo, ao longo da história, o país já sofreu grandes catástrofes proporcionadas por estes eventos que deixaram enormes rastros de destruição. O sismo de 1 de Novembro de 1755 que atingiu Lisboa é o caso mais conhecido, no qual a Baixa Ribeirinha ficou totalmente destruída. Mas existem vários outros casos idênticos a este como de 27 de Dezembro de 1722 que atingiu com elevados danos materiais a região do Algarve, o de 11 de Novembro de 1858 que atingiu a cidade de Setúbal, o de 23 de Abril de 1909 que destruiu por completo a vila de Benavente e ainda o de 28 de Fevereiro de 1969 que afetou Lisboa e o Algarve [5]. Atualmente, catálogos de sismos para Portugal, que representam o principal ingrediente para a criação de modelos de perigosidade, podem ser adquiridos através de varias fontes, como é o caso do Instituto de Meteorologia [6], Instituto Geográfico Nacional (IGN) [7], International Seismological Centre (ISC) [8] (para catálogos instrumentais) ou o projeto AHEAD [9] (para catálogos históricos), entre outros.

O cálculo da perigosidade sísmica, pode ser interpretado como um primeiro passo para a compreensão de o quão exposta está uma população ao risco sísmico, o que impulsionou vários estudos ao longo dos anos no âmbito do conhecimento da atividade sísmica em toda a região da Península Ibérica [Jiménez e García-Fernández, 1999; Montilla e Casado, 2002;

Campos-Costa *et al.*, 2006; Vilanova e Fonseca, 2007]. Estes modelos variam essencialmente no tipo de divisão do território em relação à sismicidade, no tipo de catálogo de sismos usado para a determinação dos modelos de ocorrência sísmica e correspondente metodologia de cálculo.

O trabalho aqui desenvolvido incide essencialmente sobre a exposição e vulnerabilidade e não no desenvolvimento de modelos de perigosidade sísmica, razão pela qual foi decidido adoptar-se uma proposta já existente: Vilanova e Fonseca [2007]. Este modelo trata-se da mais recente proposta para Portugal e aborda um grande número de variáveis como os diferentes zonamentos, métodos de cálculos, magnitudes mínimas dos catálogos de sismos, entre outros. Não obstante, é importante referir que frequentemente não é escolhido apenas um modelo, mas assim um conjunto de propostas que podem ser simultaneamente consideradas nos cálculos através da utilização de diagramas lógicos [Bommer e Scherbaum, 2008].

## 2.1. Modelo de perigosidade sísmica

Tal como referido anteriormente, adoptou-se o modelo proposto por Vilanova e Fonseca [2007] para o cálculo da perigosidade e risco sísmico. Os modelos de perigosidade sísmica são compostos essencialmente por dois itens: o zonamento sísmico (regiões dentro das quais assume-se uma sismicidade idêntica) e a recorrência sísmica (parâmetros que definem o modelo de ocorrência sísmica para cada uma das zonas). Neste modelo são propostos dois zonamentos, em que o primeiro divide o território nacional em onze zonas (SA), enquanto que o segundo define apenas oito regiões (SB), tal como ilustrado na Figura 2.

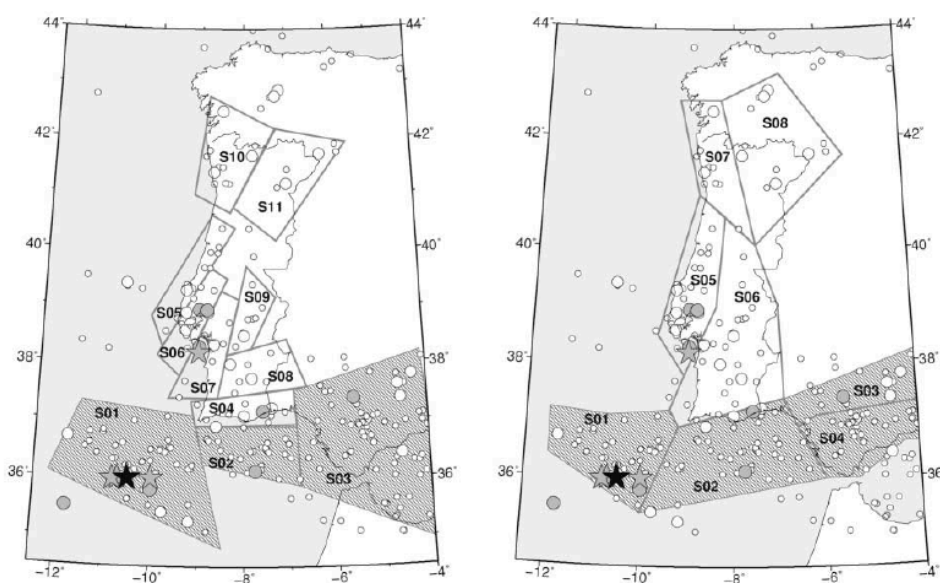


Figura 2 - Zonamento sísmico SA (esquerda) e SB (direita) proposto por Vilanova e Fonseca [2007]

Relativamente ao segundo item, foram usados dois catálogos distintos, designados por CA e CB. Em CA inclui-se um maior número de eventos sísmicos independentemente da incerteza associada, enquanto que em CB foram excluídos os eventos cuja a incerteza na magnitude excedia 0,4. Por último, os autores decidiram aplicar duas metodologias para os cálculos dos parâmetros do modelo de ocorrência sísmica: RA [Stepp, 1972] e RB [Albareello *et al.*, 2001].

Considerando as combinações entre todas estas variáveis, foram obtidas oito configurações do modelo de perigosidade sísmica. Cada combinação (e peso associado) está representada no diagrama lógico da Figura 3. É importante ainda referir que os autores realizaram este processo considerando duas magnitudes mínimas distintas, 4,0 e 4,6. No entanto, de forma a manter uma razoável quantidade de cálculos, foi considerado uma única magnitude mínima ( $M_w=4,0$ ).

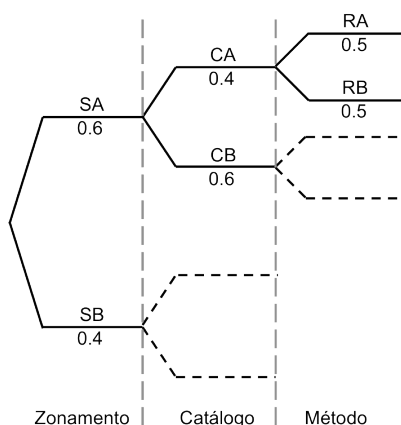


Figura 3 - Diagrama lógico considerado para os cálculos da perigosidade e risco sísmico

Depois de estabelecidas as configurações para os modelos de perigosidade sísmica, foi necessário determinar algumas características dos sismos ocorridos em cada uma das regiões definidas em ambos os zonamentos, como a sua profundidade. O cálculo destes parâmetros foi então feito com o auxílio da informação sobre eventos sísmicos do Instituto Geográfico Nacional Espanhol (IGN ES) [7], onde, para cada uma das áreas definidas, foi feita uma leitura dos sismos e retirada uma média destes os parâmetros.

## 2.2. Leis de atenuação

Apesar de um conjunto de leis de atenuação propostos por Vilanova e Fonseca [2007], foi decidido considerar outros modelos, já que nos últimos anos essas leis de atenuação foram alvo de atualização, e outros modelos foram entretanto propostos. Dado isto, foram consideradas as seguintes leis de atenuação: Abrahamson e Silva [1996], Boore e Atkinson [2008], Bommer *et al.* [2009], Chiou e Youngs [2008], Kempton e Stewart [2006], Stafford *et*

*al.* [2009], Campbell [2003], Toro [2002], Campbell e Bozorgnia [2008] e Akkar e Bommer [2010].

A escolha das leis de atenuação foi feita tendo em consideração factores como as regiões tectónicas em Portugal, o intervalo de distâncias e magnitudes suportadas pelo modelo e o catálogo de sismos usado no seu desenvolvimento. Relativamente às regiões tectónicas em Portugal, as zonas localizadas em território nacional foram assumidas como do tipo crusta continental estável (CCE), enquanto que as zonas a sul do Algarve foram classificadas como crusta ativa superficial (CAS), tal como definido na Figura 2 (CCE a branco e CAS a sombreado). Do conjunto de leis de atenuação consideradas, apenas Campbell [2003] e Toro [2002] podem ser aplicadas a regiões do tipo CCE, pelo que ambas foram consideradas, apesar de serem bastante semelhantes. Relativamente a leis de atenuação para as regiões do tipo CAS, pode-se afirmar que existe uma maior variedade de modelos. Numa seleção inicial, escolheram-se três modelos desenvolvidos com dados sobre eventos a nível global: Campbell e Bozorgnia [2008], Boore e Atkinson [2008] e Chiou & Youngs [2008] e um modelo desenvolvido essencialmente com dados sobre eventos ocorridos no Mediterrâneo e Médio Oriente: Akkar e Bommer [2010]. Posteriormente, optou-se por usar apenas o modelo de Campbell e Bozorgnia [2008] como modelo global, devido às fortes semelhanças entre as três propostas, destacando-se este modelo pela exclusão de alguns eventos do catálogo de sismos por não representarem adequadamente a região em questão. Sendo assim, combinando os dois modelos para CCE com os dois para CAS são criadas quatro combinações diferentes que serão usadas nos cálculos da vulnerabilidade. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos modelos de atenuação considerados.

Tabela 1 - Resumo dos modelos de atenuação

Modelo	Região	Magnitude (Mw)	Distância (km)	Catálogo
Toro [2002]	CCE	5,00 - 8,00	1,00 - 1000,00	Este da América do Norte
Campbell [2003]	CCE	5,00 - 8,20	0,00 - 1000,00	Este da América do Norte
Campbell e Bozorgnia [2008]	CAS	4,27 - 7,90	0,07 - 199,27	Global
Akkar e Bommer [2010]	CAS	5,00 - 7,60	0,00 - 99,00	Europa e Médio Oriente



## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Mapas de perigosidade

Aquando a avaliação das 32 combinações distintas consideradas para o estudo da perigosidade, fruto do estudo dos 8 modelos de perigosidade utilizando as 4 combinações dos modelos de atenuação já referidos anteriormente, determinou-se a mediana a partir da qual se desenvolveu o mapa apresentado na Figura 4. Criou-se também um mapa com os valores para o percentil 16 e 84, apresentados na Figura 5, que representam o valor da média subtraída e somada do desvio padrão, respetivamente, o que garante com uma probabilidade de cerca de 70%, que os valores de perigosidade encontram dentro deste intervalo. Os mapas foram calculados para um solo do tipo rocha.

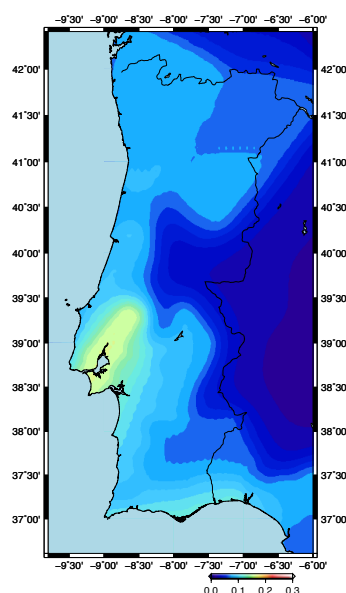


Figura 4 - Mapa de perigosidade da mediana [PGA]

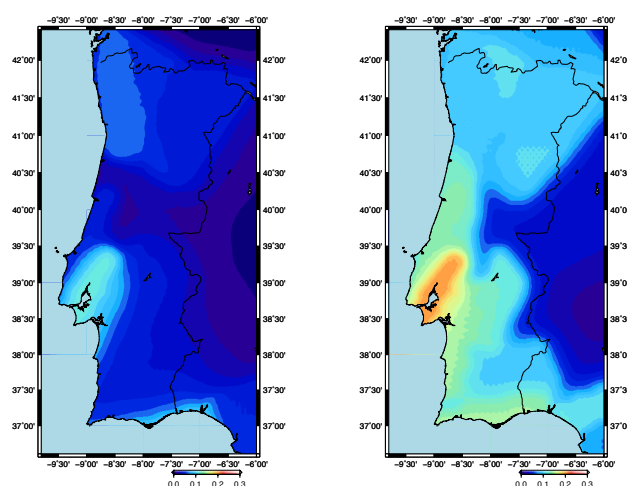


Figura 5 - Mapa de perigosidade para o percentil 16 (esquerda) e para o percentil 84 (direita) [PGA]

### 2.3.2. Curvas de perigosidade sísmica

As curvas de perigosidade sísmica são uma forma mais pormenorizada de se apresentar os resultados da perigosidade para zonas específicas e, assim sendo, são na Figura 6 apresentadas as curvas para algumas cidades de Portugal: Faro, Lisboa, Aveiro e Porto. É possível observar-se uma maior perigosidade sísmica para a cidade de Lisboa seguida da cidade de Faro, enquanto que as cidades que apresentam menor perigosidade sísmica de as estudadas correspondem às cidades de Aveiro e Porto.

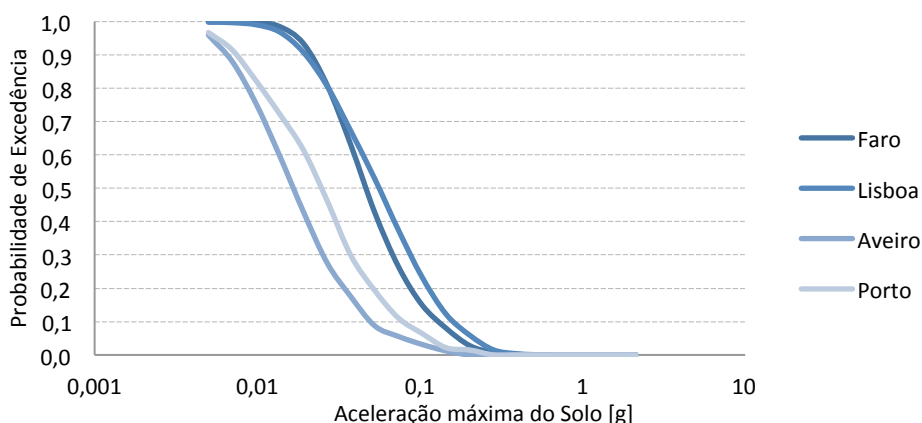


Figura 6 - Curvas de perigosidade para algumas das principais cidades de Portugal

### 2.3.3. Discussão dos resultados

Após a avaliação de todas as configurações considerados para o cálculo da perigosidade e a obtenção da sua mediana, é relevante verificar qual das 32 combinações usadas se encontra mais próxima destes valores. Averiguou-se então que de todas as combinações, a que se apresenta mais próxima da mediana é a combinação SA\_CA\_RB com as leis de atenuação Toro [2002] para CCE e Campbell e Bozorgnia [2008] para CAS.

Quanto aos percentis 16 e 84, conferiu-se que as combinações que se aproximam mais dos seus valores foram a SB\_CB\_RA com as leis de atenuação Campbell [2003] para CCE e Campbell e Bozorgnia [2008] para CAS e a SA\_CB\_RB com as leis as leis de atenuação Campbell [2003] para CCE e Campbell e Bozorgnia [2008] para CAS, respectivamente.

Avaliando todos os resultados em que foram usadas as 4 combinações dos modelos de atenuação considerados para este trabalho, concluiu-se que a combinação que forneceu os valores menores corresponde ao modelo de Toro [2002] para CCE de Akkar e Bommer [2010] para CAS enquanto que a combinação que forneceu os valores mais elevados foi a combinação Campbell [2003] para CCE e Campbell e Bozorgnia [2008] para CAS.

### 3. EXPOSIÇÃO

No modelo de exposição trata-se da distribuição espacial do valor (económico ou humano) dos elementos expostos à ação sísmica. Este pode compreender informação sobre a localização dos elementos, tipo de ocupação, função do edificado, existência de bens económicos, taxa de ocupação, valor histórico/cultural, entre outros. Um centro histórico terá um elevado valor patrimonial e cultural e uma área de elevada densidade populacional terá uma vasta atividade comercial e de serviços o que significa um elevado nível de exposição, ao contrário de uma área preferencialmente florestal ou agrícola, com reduzidos valores populacionais, comerciais ou patrimoniais [Vicente, 2008].

A classificação de edifícios é um dos passos importantes no estudo do risco sísmico e é necessário que esta categorização retrate as características dos mesmos. De modo a tornar esta tarefa possível, foram desenvolvidas nos últimos anos diversas escalas que permitem a classificação do edificado de acordo com alguns parâmetros como o material de construção, tipo de estrutura, altura do edifício, idade, etc. Esta forma de classificar os edifícios está ligada ao grau de informação que se possui sobre o parque habitacional. Algumas destas escalas foram feitas com o intuito de harmonizar a forma como se classificam os edifícios na Europa [Grünthal, 1998] ou até mesmo globalmente [Jaiswal *et al.*, 2010]. No entanto, tal abordagem implica que apenas se considerem alguns parâmetros básicos do edificado, devido à escassez de informação detalhada na maioria dos países. Por outro lado, quando a informação é bastante completa, é comum que o próprio país desenvolva o seu próprio sistema de classificação, permitindo assim que se incorpore um maior número de parâmetros.

Com a implementação dos CENSOS em Portugal, passou a ser possível fazer um controlo da população no entanto, só em 1970 é que se realizou o primeiro Recenseamento Geral da Habitação, que se tem repetido a cada 10 anos. Esta evolução tornou possível a sistematização do conhecimento do parque habitacional de Portugal [10].

No estudo que aqui se pretende desenvolver, foi decidido organizar-se as classes de edifícios de acordo com a informação proveniente dos CENSOS de 2001 [Carvalho *et al.*, 2001; 10], descrita na secção seguinte.

#### 3.1. Parque habitacional português

Portugal tem séculos de história, e como tal, já passou por inúmeras mudanças, e o parque habitacional, como não poderia deixar de ser, acompanhou esta evolução. Existem atualmente

habitações em Portugal com mais de 100 anos, cujo comportamento estrutural difere consideravelmente da construção que se pratica hoje em dia, e consequentemente, também a sua resistência sísmica. De modo a que fosse possível a caracterização e catalogação do parque habitacional português, foi realizada uma recolha de diversos documentos como publicações científicas, dissertações, relatórios efetuados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e dados provenientes dos CENSOS 2001 [INE, 2002], sendo este último documento, a fonte principal de informação para este estudo.

Aquando da elaboração do Recenseamento Geral de Habitação de 2001, foram contabilizados 2 997 659 edifícios, que tal como o próprio nome indica, inclui somente os edifícios de habitação, o que significa que os restantes edifícios não residenciais (exclusivamente comerciais, industriais ou infraestruturas públicas) não serão considerados na avaliação do risco sísmico. Dentro dos vários parâmetros recolhidos durante os CENSOS 2001, destacam-se alguns que permitem tirar conclusões sobre a vulnerabilidade estrutural dos edifícios, nomeadamente: o tipo de construção, o número de pisos e a época de construção ou reconstrução do edifício. Deste modo, dividiu-se então o parque habitacional segundo três categorias, que por sua vez se subdividem em várias classes, tal como apresentado na Tabela 2. Relativamente à tipologia de construção do edificado, esta divide-se em cinco classes de modo a caracterizar o comportamento do edifício ao sismo, sendo esta categoria uma das que mais influencia a vulnerabilidade sísmica da estrutura. Quanto ao número de pisos criou-se três classes de modo a organizar os edifícios em baixos (1 a 3 pisos), médios (4 a 6 pisos) e altos (7 pisos ou mais). Por fim, para a época de construção ou reconstrução dos edifícios, optou-se apenas por duas classes: antes e depois de 1983, data da implementação do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes [RSA, 1983].

Tabela 2 - Categorias consideradas na catalogação do parque habitacional português

Tipologia de construção do edifício	Número de pisos	Época de construção
Estrutura de betão armado	1 a 3	
Paredes de alvenaria argamassada, com placa		até 1982
Paredes de alvenaria argamassada, sem placa	3 a 6	
Paredes de adobe, taipa ou de alvenaria de pedra solta		de 1983 a 2001
Outros (madeira, metálica, etc.)	7 ou mais	

Através da análise dos dados provenientes dos Recenseamentos Gerais de Habitação [Carvalho *et al.*, 2001], observou-se a distribuição do número de edifícios de acordo com cada uma das categorias suprarreferidas, sendo os resultados apresentados seguidamente. No que diz respeito ao tipo de construção, constatou-se que mais de metade do Parque Habitacional Português é composto por edifícios de alvenaria (ver Figura 7), o que representa uma tipologia construtiva geralmente mais susceptível a danos devido à ação sísmica.

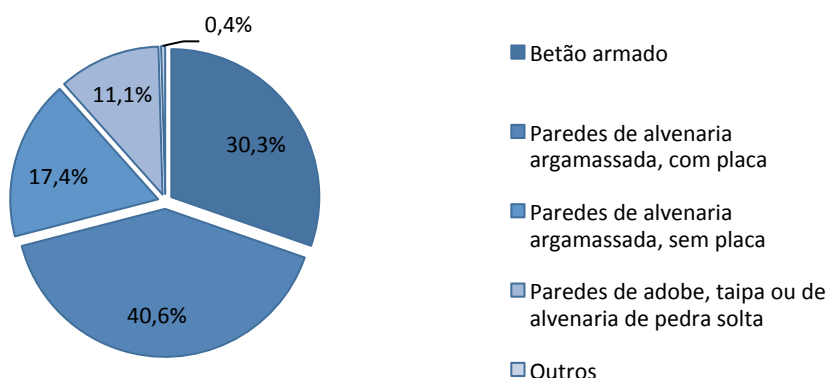


Figura 7 - Percentagem de edifícios por tipo de estrutura [Carvalho *et al.*, 2001]

Analisando de seguida os edifícios de acordo com a época de construção, pode-se observar que um grande número de edificações foi construído anteriormente à implementação do RSA (1983), e consequentemente, provavelmente sem um dimensionamento capaz de resistir adequadamente à ação sísmica (ver Figura 8). Na realidade, estima-se que este panorama possa ser ainda mais gravoso, se considerarmos que existiu um período no qual ocorreu construção sem que este regulamento fosse devidamente respeitado, tal como será explicado na Secção 3.3.

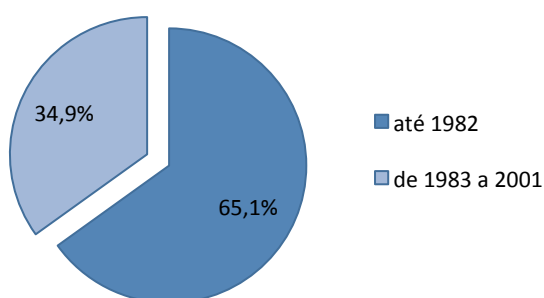


Figura 8 - Percentagem de edifícios por época de construção [Carvalho *et al.*, 2001]

Por fim, foi analisada a distribuição de edifícios em relação ao número de pisos, tendo-se concluído que o Parque Habitacional Português é constituído maioritariamente por construções de pequena altura, tal como ilustrado na Figura 9.

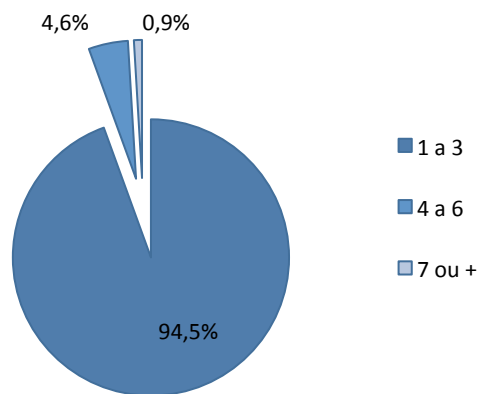


Figura 9 - Percentagem de edifícios de acordo com o número de pisos [Carvalho *et al.*, 2001]

A distribuição dos edifícios em Portugal de acordo com as três categorias consideradas encontra-se resumidamente representada na Figura 10.

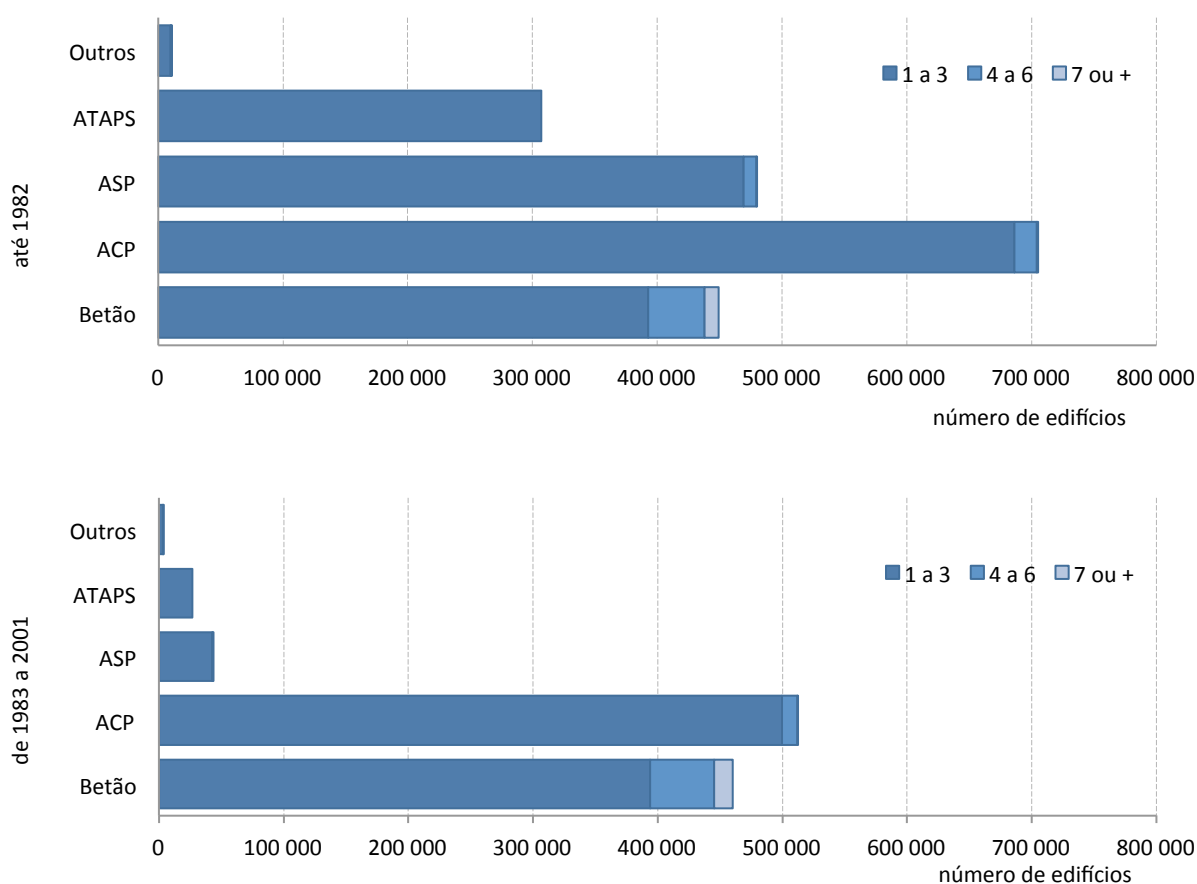


Figura 10 - Distribuição do parque habitacional português de acordo com a época de construção, tipo de construção e número de pisos [Carvalho *et al.*, 2001]

### 3.2. Desenvolvimento do modelo de exposição

Para que o cálculo das perdas económicas devido à ação sísmica fosse possível, foi necessário a elaboração de um modelo de exposição que definisse a variação espacial do valor económica ao longo do território nacional. Para a criação deste modelo, foram usados os

dados provenientes dos CENSOS 2001 como o principal recurso, já que trata-se do documento mais recente com informação detalhada ao nível do município. No entanto, é importante referir que recentemente o Instituto Nacional de Estatística (INE) disponibilizou os dados preliminares dos CENSOS 2011 [INE, 2011], que contém informação relativamente à variação do número de edifícios para cada região, sem fazendo qualquer distinção entre as diferentes categorias construtivas.

Reconhecendo que importantes alterações podem ter ocorrido no Parque Habitacional Português nos últimos 10 anos, foi decidido criar-se um modelo de exposição puramente baseado nos dados dos CENSOS 2001, e posteriormente calibrá-lo de acordo com os dados preliminares oriundos dos CENSOS 2011. Para tal, usou-se o número de edifícios por zona de atuação das Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), Norte, Centro, Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve, para ajustar o número total de edifícios em 2001, para o que se contabilizou em 2011. No entanto, é importante entender que este aumento não pode ser aplicado de forma linear, já que o crescimento de cada tipologia construtiva varia significativamente. Por exemplo, nos últimos anos tem-se observado a uma diminuição de edifícios de alvenaria sem placa, e em contrapartida, a um aumento dos edifícios em betão armado. De forma a considerar esta tendência, as variações da quantidade de cada tipologia construtiva nos últimos 30 anos foram usadas para extrapolar-se uma distribuição para o ano de 2011. Na Figura 11 representa-se a variação de edifícios de betão armado para a zona Norte nos últimos anos e o valor estimado para 2011, calculado através de uma linha de tendência polinomial de grau 2.

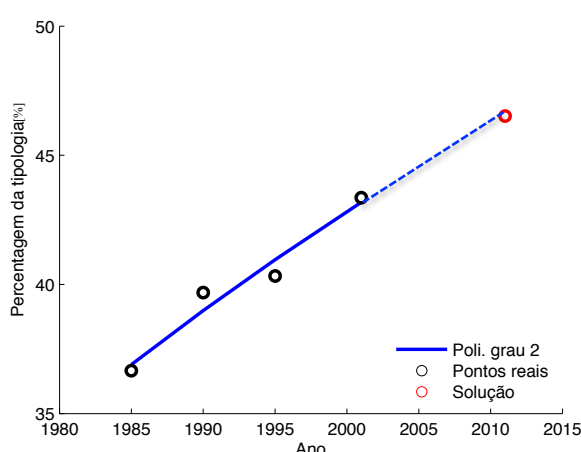


Figura 11 - Extrapolação da percentagem de edifícios de betão armado em 2011 para a zona Norte

Apesar de se reconhecer os pontos negativos desta abordagem, assumiu-se que os benefícios em usar-se um modelo de exposição mais próximo do que existe na realidade, supera a

desvantagem de possíveis incertezas serem introduzidas devido à aproximação da distribuição para o ano 2011.

### 3.2.1. Catalogação do parque habitacional português

Este modelo de exposição utiliza como distribuição espacial as áreas dos concelhos de Portugal Continental, perfazendo 278 zonas. De forma a estudar convenientemente todos os edifícios existentes em Portugal à data de 2011, foi realizada uma catalogação destes edifícios de acordo com as categorias mencionadas na secção anterior. A descrição desta classificação será apresentada em duas partes: para edifícios de betão armado e para as restantes tipologias construtivas. Para a primeira tipologia, os edifícios foram organizados segundo o código de construção (baixo - anterior ao RSA (LC) e alto - posterior ao RSA (HC)) e de acordo com o número de pavimentos (baixo - 1 a 3 (LR), médio - 4 a 6 (MR) e alto, +7 (HR)). Para cada configuração foi criado um código, tal como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação das em betão armado

Código/Altura	Baixa	Média	Alta
até 1982	RC_LR_LC	RC_MR_LC	RC_HR_LC
de 1983 a 2011	RC_LR_HC	RC_MR_HC	RC_HR_HC

Por exemplo, um edifício de betão armado construído em 1990, e com 5 pavimentos seria denominado por RC\_MR\_HC. É relevante ainda referir que inicialmente foi também considerado uma categoria para edifícios construídos depois do ano 2000, de forma a distinguir estruturas que pudessem ter sido dimensionadas de acordo com as recentes recomendações dos Eurocódigos. No entanto, após a consulta de especialistas de entidades privadas e da análise dos parâmetros geométricos de projetos desenvolvidos neste período, conclui-se que não existem diferenças significativas entre estes edifícios e os construídos entre 1983 e 2011, que justificassem a criação de uma classe adicional. Este aspecto não se deve necessariamente devido às exigências entre os dois regulamentos serem semelhantes, mas provavelmente devido ao facto de mesmo após o ano de 2000, continuar a ser comum o uso do RSA.

Relativamente às restantes tipologias construtivas, (edifícios de Alvenaria Argamassada com Placa (ACP), de Alvenaria Argamassada sem Placa (ASP), em Adobe (A), em Taipa (TP) e de Alvenaria de Pedra Solta (RS)), foi decidido não se criar subclasses de acordo com o tipo de código, já que não ocorreram alterações significativas nas práticas construtivas deste



tipo de edifícios devido à introdução do RSA. Para além disto, de acordo com os dados dos CENSOS 2001, algumas tipologias construtivas não apresentam alturas superiores a 3 andares, como é o caso do Adobe, da Taipa e da Alvenaria de Pedra Solta, ou superior 6 pisos, para o caso da Alvenaria Argamassada sem Placa. A classificação destas tipologias, assim como o respectivo código, encontram-se descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação das tipologias de edifícios de paredes de alvenaria argamassada sem placa e ATAPS

Altura/ Tipologia	ACP	ASP	A	TP	RS
Baixa	ACP_LR	ASP_LR	A	TP	RS
Média	ACP_MR	ASP_MR	-	-	-
Alta	ACP_HR	-	-	-	-

### 3.2.2. Cálculo do valor económico

Usando-se a distribuição do número de edifícios por concelho estimado na secção anterior, estimou-se o correspondente valor económico. É importante clarificar-se que entende-se como valor económico o montante que seria necessário para a reconstrução total de um dado edifício caso este colapsasse devido à ação sísmica nos dias de hoje, e não o quanto custou à data da sua construção original. Esta conversão entre o número de edifícios e o seu valor económico implica um grande número de simplificações e aproximações, pelo que é importante referir que quaisquer resultados obtidos usando este modelo devem ser encarados como o panorama geral à escala nacional. Para um estudo a um nível regional ou local, é claro que informação com uma maior especificidade e exatidão deveria ser utilizada. Todas estas limitações são identificadas e descritas no final deste capítulo.

O custo médio da construção em Portugal para 2012 encontra-se definido na Portaria nº 291/2011, estabelecendo-se um preço por metro quadrado para três tipos de zonas, tal como descrito na Tabela 5. O preço decresce da zona I para a zona III, pois na zona I encontram-se as capitais de distrito e outros grandes centros urbanos enquanto que as zona II zona III cobrem as regiões mais rurais, onde o custo de construção é menor.

Tabela 5 - Custo médio por metro quadrado da construção a vigorar em 2012 [Portaria nº 291/2011]

Zona I	Zona II	Zona III
594,96 €	520,08 €	471,18 €

A área total de construção por edifício foi determinada através da combinação da área média por fogo e do número de fogos por cada edifício, de acordo com o seu número de pisos. Um estudo realizado a nível nacional pelo Instituto Nacional de Estatística [INE, 2010] fornece valores médios de área por fogo para cada zona de atuação da CCDR, tal como descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Área média por fogo para cada zona de atuação das CCDR

Zonas	Norte	Centro	Lisboa e Vale do Tejo	Alentejo	Algarve
Área média por fogo [m <sup>2</sup> ]	107,5	111,1	102,5	97,1	87,3

O número de fogos por edifício está naturalmente relacionado com seu número de pisos. Para a determinação deste parâmetro, mais uma vez recorreu-se aos dados provenientes dos CENSOS 2001, que permitiram o cálculo destes valores para as cinco zonas de atuação das CCDR, cujos resultados encontram-se ilustrados na Figura 12.

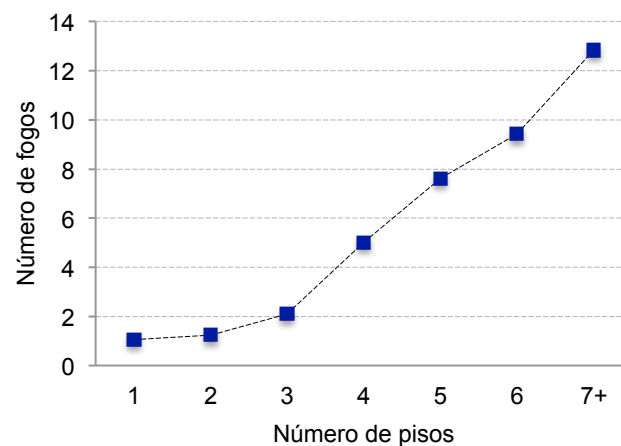


Figura 12 - Número de fogos por edifício de acordo com o número de pisos

O valor final para cada concelho pode então ser traduzido pela equação 1:

$$\Sigma \left[ n^{\circ} \text{edifícios} \times n^{\circ} \text{fogos}_{\text{edifício}} \times \text{área}_{\text{fogo}} \times \text{custo}_{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$

A título de exemplo, a Tabela 7 apresenta os parâmetros envolvidos no cálculo do valor económico para os edifícios da classe RC\_LR\_HC no concelho de Aveiro, assim como o respetivo resultado final.

Tabela 7 - Cálculo do valor económico de edifícios do tipo RC\_LR\_HC para o concelho de Aveiro.

Classe	Nº de pisos	Nº de edifícios	Nº de fogos por edifício	Área por fogo [m <sup>2</sup> ]	Custo por m <sup>2</sup> [€/m <sup>2</sup> ]	Valor económico [milhões de €]	Valor económico da classe [milhões de €]
RC_LR_HC	1	2629	1,021	111,1	594,96	177,5	332,9
	2	1701	1,086	111,1	594,96	122,1	
	3	360	1,400	111,1	594,96	33,3	

Resta apenas referir que o custo de construção por metro quadrado foi reduzido em 25%, de forma a excluir o valor da compra do terreno, tal como recomendado pela Portaria nº 291/2011. Considerando os 278 concelhos existentes e as 14 classes construtivas, obteve-se um total de 3289 elementos de exposição e avaliou-se o Parque Habitacional Português em cerca de 283 269 milhões de euros.

Através destes resultados, é possível determinar o número de edifícios e correspondente valor económico para cada uma das 14 classes construtivas, tal como apresentado na Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

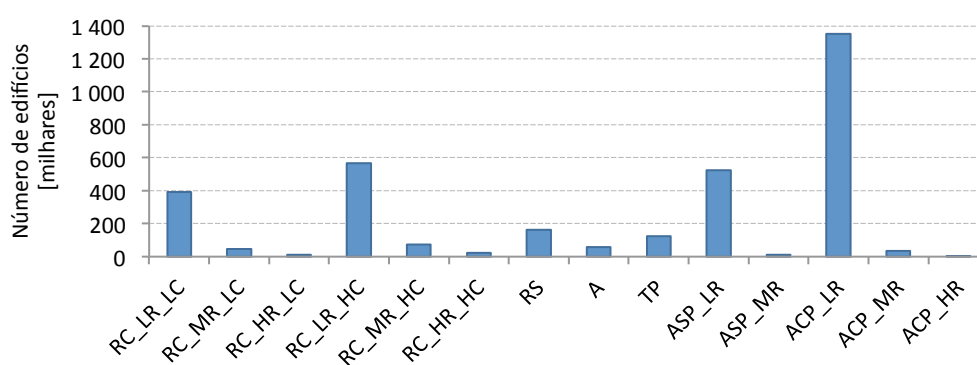


Figura 13 - Número de edifícios por classe construtiva

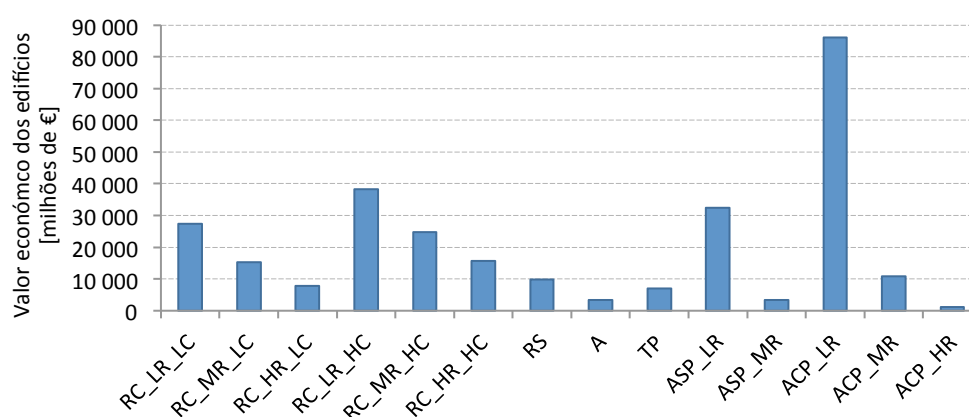


Figura 14 - Valor económico por classe construtiva

Por último, agregou-se os resultados por tipo de construção (Figura 15), de modo a que fosse possível compreender-se a distribuição do valor económico de acordo com este critério.

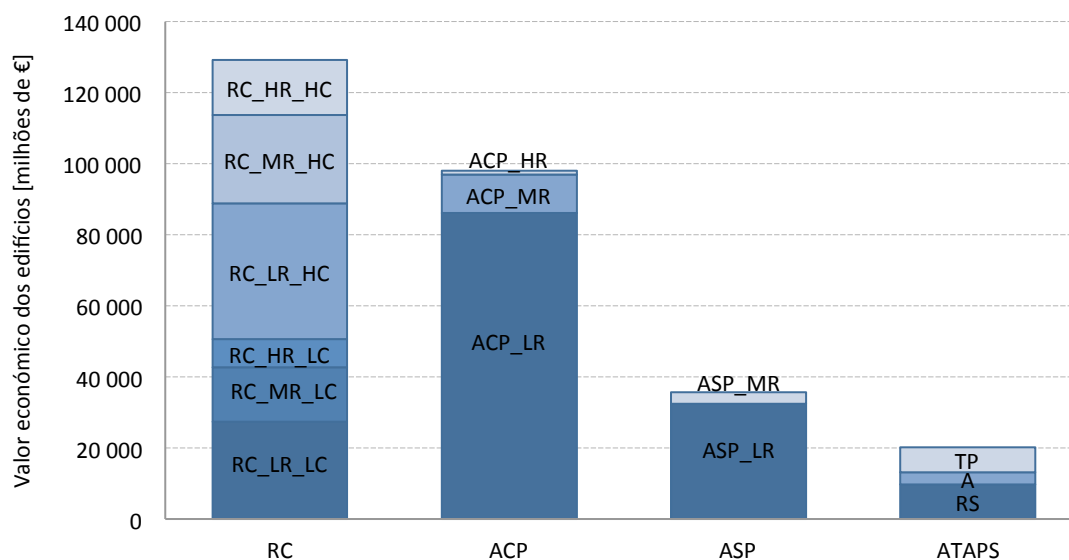


Figura 15 - Valor económico por tipos de construção

Através da análise dos resultados presentes na Figura 15, pode-se concluir que apesar dos edifícios de betão armado constituírem somente cerca de 30% do edificado, estes representam mais de 50% do valor económico total. Este aspecto deve-se fundamentalmente ao facto de este tipo de construção suportar um maior número de fogos em Portugal.

### 3.2.3. Distribuição espacial do valor económico

No estudo do risco sísmico, além de ser necessário caracterizar convenientemente o edificado, é igualmente importante perceber qual a sua distribuição espacial. Na Figura 16 e Figura 17 são apresentados mapas com a distribuição do valor económico por tipo de construção.

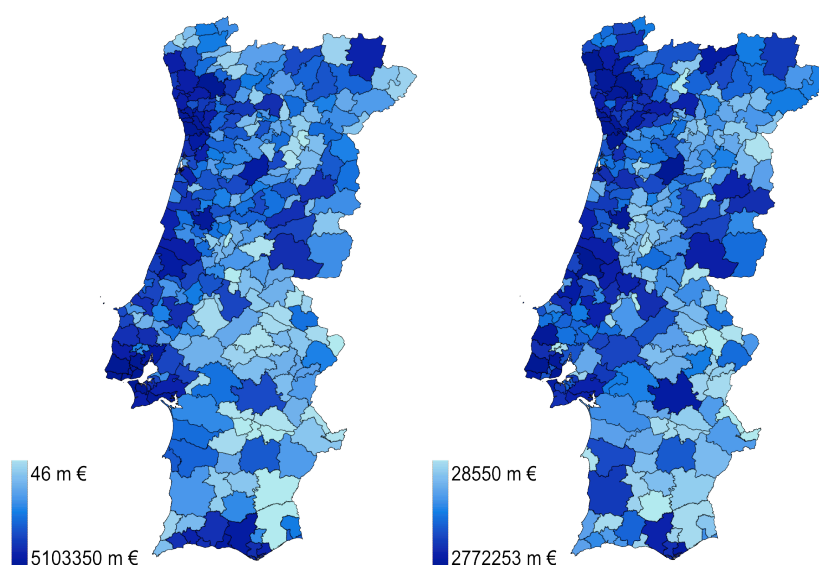


Figura 16 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) dos edifícios de betão armado (esquerda) e de alvenaria argamassada com placa (direita)

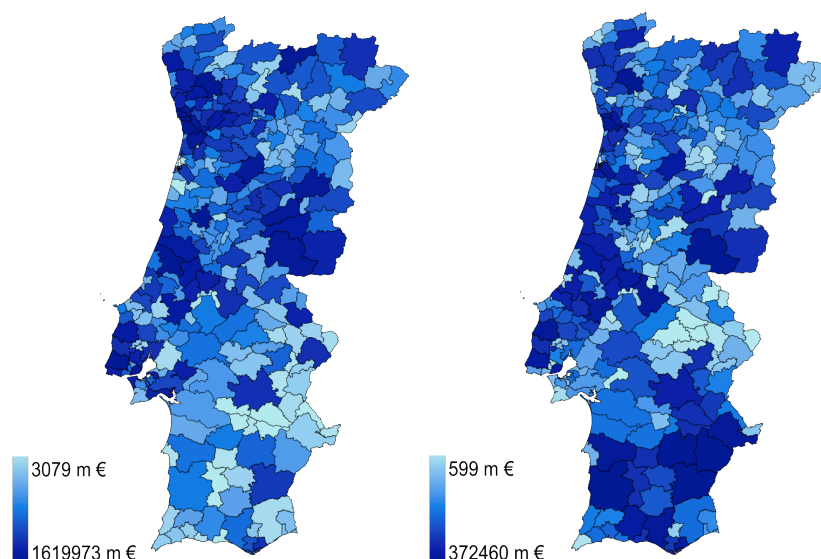


Figura 17 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) dos edifícios de alvenaria argamassada sem placa (esquerda) e de alvenaria de taipa, adobe e pedra solta (direita).

A análise dos resultados permitiu verificar-se que o concelho que apresenta o maior número de edifícios é o de Vila Nova de Gaia, enquanto que o concelho de Barranco apresenta a menor quantidade. Relativamente ao concelho com um maior valor económico, o concelho de Sintra aparece em primeiro na lista e novamente Barranco apresenta o menor valor. De uma forma geral, observa-se a uma maior concentração do edificado no litoral do país.

#### 3.2.4. Limitações e simplificações

Tal como referido anteriormente, a criação de um modelo de exposição à escala nacional implica um grande número de simplificações, que consequentemente reduzem a fidelidade e introduzem incertezas no modelo final. A identificação destas aproximações permite a utilização do modelo de exposição consciente das suas limitações. Este exercício serve também o propósito de assinalar as zonas que ainda podem ser melhoradas em desenvolvimentos futuros:

- Calibração para o ano 2011: o processo de calibração descrito anteriormente tem um erro associado, que poderia ser evitado caso os dados definitivos para o ano de 2011 já se encontrassem disponíveis. Adicionalmente, seria interessante usar-se esta informação à resolução da freguesia, e não do concelho;
- Distribuição dos edifícios de Adobe, Taipa e de Alvenaria de Pedra Solta: a distribuição destas tipologias pelo território nacional foi feita de forma grosseira, já que os CENSOS 2011 incluem as três tipologias construtivas no mesmo grupo;

Considerado a presença de Adobe no litoral, Taipa no Alentejo e Algarve e Alvenaria de pedra solta no centro e norte;

- Custo de construção: reconhece-se que foi usado o mesmo valor para todas as tipologias construtivas, e que seria proveitoso averiguar-se qual o custo de construção específico de cada tipologia construtiva;
- Número de fogos por edifício: este parâmetro foi usado independentemente da tipologia construtiva ou época de construção. Poderia ser benéfico o cálculo desta propriedade de acordo com estes dois factores;
- Área média por cada fogo: os valores usados para este parâmetro foram estimados para a atualidade, pelo que seria vantajoso obter-se estes valores para outras épocas.

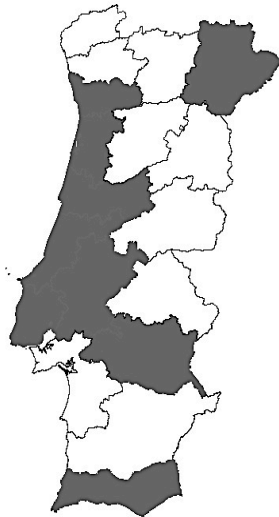
Apesar das limitações suprarreferidas, é importante compreender que para que fosse possível a análise do risco sísmico a nível nacional, estas aproximações foram inevitáveis.

### **3.3. Propriedades geométricas do parque habitacional português**

Um dos objetivos desta dissertação é a recolha de informação sobre as características geométricas de edifícios de betão armado. Esta tipologia construtiva representa cerca de 30% do parque habitacional português e suporta aproximadamente 50% dos fogos familiares [Sousa, 2006]. Outra razão para a escolha desta tipologia construtiva está no facto de se pretender usar uma metodologia analítica para a avaliação da vulnerabilidade, que geralmente fornece resultados mais representativos para construções em betão armado, em relação a estruturas em alvenaria.

Tendo em vista a sistematização do conhecimento das características geométricas de forma a melhorar a determinação da vulnerabilidade estrutural deste tipo de edifícios, estudou-se os seguintes parâmetros:

- Ano de construção;
- Números de pisos;
- Altura do primeiro piso;
- Altura dos pisos superiores;
- Secção média dos pilares (comprimento e altura);
- Secção média das vigas (comprimento e altura);
- Comprimento médio das vigas;
- Espessura da laje.



vigas e as respetivas curvas de distribuição consideradas e os resultados os restantes parâmetros são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Quadro resumo das características geométricas

Característica geométrica	Tipologia	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação	A *	B **
vão médio das vigas	todos os edifícios	Lognormal	4,390	0,731	0,1666	2,87	6,40
altura média das vigas	até 1982	Lognormal	0,427	0,0779	0,1825	0,23	0,60
	de 1983 a 2011	Normal	0,508	0,0786	0,1547	0,38	0,67
largura média das vigas	até de 1982	Lognormal	0,273	0,0386	0,1416	0,20	0,36
	de 1983 a 2011	Normal	0,274	0,0501	0,1825	0,16	0,40
altura do 1º piso	todos os edifícios	Lognormal	3,274	0,4309	0,1316	2,45	4,87
altura dos pisos regular	todos os edifícios	Normal	2,915	0,2089	0,0717	2,20	3,79
altura da secção do pilar	LR	Normal	0,291	0,0380	0,1306	0,23	0,38
	até 1982	MR	0,323	0,0514	0,1590	0,24	0,51
	HR	Normal	0,457	0,1538	0,3365	0,28	0,68
	LR	Normal	0,381	0,0700	0,1836	0,27	0,52
	de 1983 a 2011	MR	0,439	0,0713	0,1624	0,32	0,55
	HR	Normal	0,452	0,1463	0,3234	0,30	0,86
	LR	Lognormal	0,277	0,0259	0,0932	0,23	0,32
	até 1983	MR	0,281	0,0270	0,0961	0,20	0,31
largura da secção do pilar	HR	Normal	0,276	0,0620	0,2248	0,20	0,35
	LR	Normal	0,256	0,0271	0,1059	0,20	0,30
	de 1983 a 2011	MR	0,274	0,0318	0,1162	0,20	0,37
	HR	Normal	0,301	0,0898	0,2981	0,21	0,53
espessura da laje	até 1983	Normal	0,180	0,0345	0,1919	0,10	0,28
	de 1983 a 2011	Lognormal	0,2572	0,0442	0,1717	0,15	0,31

\* - valor menor da amostra

\*\* - valor maior da amostra



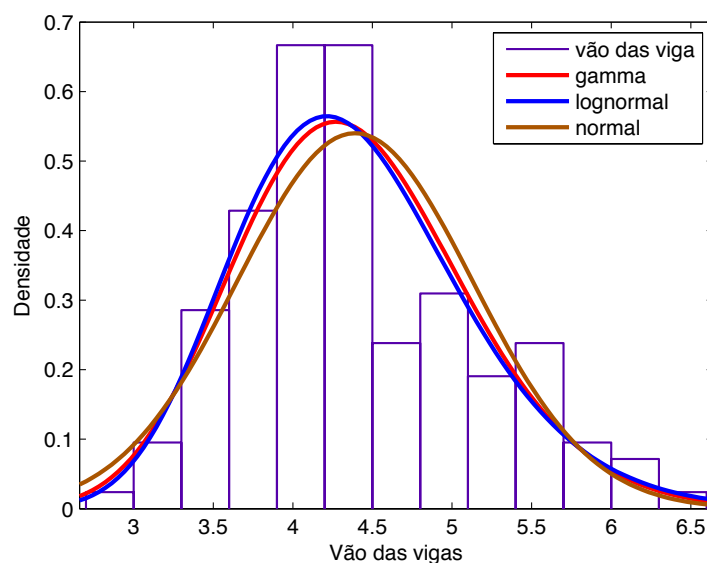


Figura 19 - Histograma com distribuição do vão médio das vigas e respetivas curvas de distribuição probabilísticas consideradas

É importante ainda referir a correlação existente entre o vão e a altura das secções das vigas. Por outras palavras, observou-se que o aumento do comprimento das vigas é acompanhado por um aumento da secção das mesmas. Esta relação é claramente devido à necessidade de uma inércia mais elevada para vigas de maior vão, provavelmente sujeitas a um maior momento flector. A Figura 20 ilustra a dispersão entre estes dois parâmetros.

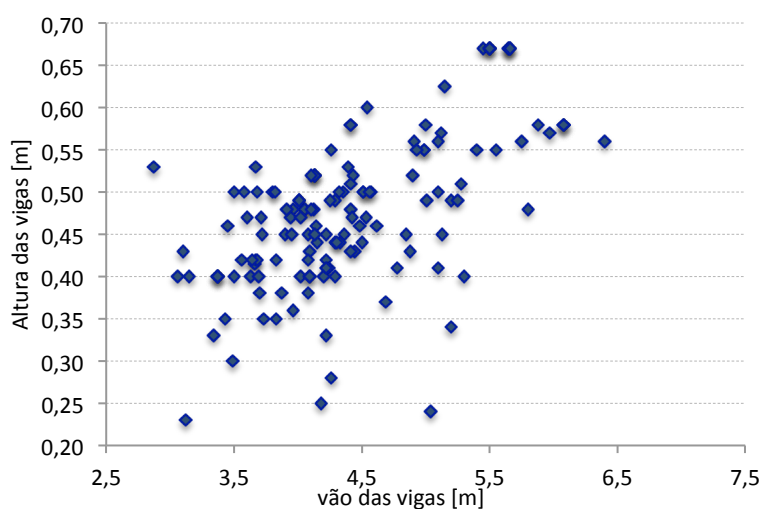


Figura 20 - Relação entre o vão e a altura das vigas

Foi estimado para esta distribuição um coeficiente de correlação de cerca de 0,6. Este resultado é fundamental no caso de se querer usar as distribuições probabilísticas apresentadas na Tabela 8 para a geração aleatória de edifícios. Sem a consideração desta correlação, este processo poderia dar origem a situações irrealistas, em que seriam geradas vigas de longo comprimento e reduzida altura, ou vice-versa.

### 3.3.2. Discussão de resultados

Em seguida são analisadas detalhadamente a evolução de algumas das características geométricas. No caso da altura média da secção das vigas, conclui-se que nos projetos antes de 1983 para os projetos depois de 1983, existe um acréscimo na ordem 19,0%. Este aumento significativo deve-se a fraca regulamentação até ao surgimento do RSA, que dá uma maior relevância a ação. Apesar da altura da secção variar consideravelmente nestas duas épocas, a largura das vigas mantém-se constante, verificando-se apenas uma variação de 0,5%. Esta reduzida diferença deve-se provavelmente ao facto da largura das vigas estar frequentemente ligada a constrangimentos arquitectónicos, como a largura das paredes de enchimento. De forma similar, relativamente aos pilares verifica-se que em ambas as épocas de construção existe um aumento da altura da secção com o aumento do número de pisos. Para os dados anteriores a 83, dos edifícios de altura baixa para média existe um aumento de 11,3% e da altura média para a alta observa-se um aumento de 41,3%, enquanto que para os edifícios posteriores a 1983, existe um aumento de 15,2% e de 3,0%, respectivamente. Este aumento era o resultado esperado, pois com o aumento de pisos dos edifícios a carga axial nos pilares aumenta. Contudo, na primeira época construtiva os valores têm um aumento bastante elevado de edifícios de altura média para alta, aumento esse que é justificado pelo facto de em edifícios de menor porte os pilares frequentemente não serem devidamente dimensionados, e ser considerada uma secção reduzida e idêntica para todos os pilares enquanto que nos edifícios de grande porte, é habitual observar-se um sobredimensionados das secções, provavelmente de forma a compensar a falta de conhecimento sobre as cargas axiais e momentos flectores. No que diz respeito ao aumento da altura da secção dos pilares entre épocas construtivas, verifica-se que para edifícios de altura baixa e média, existe um aumento de 31,1% e 35,8 %, respectivamente, enquanto que para edifícios altos o seu valor mantém-se praticamente constante.

### 3.4. Propriedades materiais do parque habitacional português

A caracterização das propriedades materiais do edificado é, tal como a caracterização das propriedades geométricas, uma etapa importante no estudo da exposição. Contudo, esta pesquisa não foi possível concretizar pois existiam vários entraves, desde o facto de ser necessário o deslocamento a número considerável de edifícios em vários locais do país para conseguir a amostra uniforme, como seria também necessário a recolha de alguns provetes para testar em laboratório as suas propriedades e não existia permissão para tal.

Assim sendo, recorrendo à literatura, onde se encontram alguns trabalhos já desenvolvidos nesta área, foram considerados os trabalhos desenvolvidos por Bal *et al.* [2008], que tem como base de estudo edifícios da Turquia, e por Rossetto e Elnashai [2005], que caracteriza as propriedades materiais de edifícios de Itália. Contudo, as características consideradas para os materiais do parque habitacional português seguem os valores considerados no trabalho de Bal *et al.* [2008] cujos seus valores são apresentados de seguida na Tabela 9. De destacar que apesar de o betão apresentar a mesma resistência para edifícios de código de construção alto e baixo, a resistência do aço é distinta entre estas duas épocas, sendo que é considerado o ano 1990 como separação de períodos.

Tabela 9 - Propriedades dos materiais [Bal *et al.*, 2008]

distribuição/ características	resistência do betão [MPa]	resistência do aço antes de 1990 [MPa]	resistência do aço depois de 1990 [MPa]
média	16,7	371,1	473,0
coef. de variação [%]	50	24	15



## 4. VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade representa a probabilidade de uma dada estrutura sofrer danos quando sujeito à ação sísmica. A vulnerabilidade está diretamente relacionada com as propriedades do edificado, tais como, a tipologia construtiva, o número de pisos, dimensões dos elementos estruturais, etc. O grande objetivo da análise da vulnerabilidade é o desenvolvimento de modelos que relacionem, para uma dada estrutura, a intensidade de um sismo com os seus potenciais efeitos.

Ao analisar a literatura pode-se averiguar que existem dois grandes grupos de métodos de avaliação da vulnerabilidade: os métodos mecanicistas ou analíticos e os métodos empíricos ou estatísticos. Para os primeiros a vulnerabilidade é calculada recorrendo a modelos numéricos onde se avaliam, em sequência, a resposta sísmica e os danos, fornecendo curvas de fragilidade. Nos modelos empíricos ou estatísticos a avaliação é mais expedita, baseada na opinião de especialistas na matéria ou em estatísticas de danos reais causados por sismos anteriores, que associam os danos a escalas de fragilidade [Sousa *et al.*, 2003]. Como já foi referido anteriormente, neste trabalho foi usada uma metodologia analítica para a avaliação da vulnerabilidade [Silva *et al.*, 2012\_c]. Os dados recolhidos na secção anterior permitiram desenvolver-se curvas de vulnerabilidade para os edifícios em betão armado, enquanto que para as restantes tipologias construtivas recorreu-se à literatura existente para a recolha de curvas de fragilidade desenvolvidas por outros autores.

### 4.1. Determinação das curvas de fragilidade

O desenvolvimento de metodologias analíticas ou mecanicistas surgiu principalmente como solução para o problema da falta de informação sobre danos em edifícios após sismos. Vários métodos têm vindo a ser propostos com diferentes graus de exatidão ao longo dos anos, mas geralmente partilhando uma grande desvantagem: o tempo e esforço computacional necessário [Silva *et al.*, 2012\_a]. De forma a contornar este obstáculo, uma metodologia simplificada baseada no princípio do “Displacement-based Earthquake Loss Assessment - DBELA” [Crowley *et al.*, 2004] foi desenvolvida, que permite a consideração das incertezas nas propriedades materiais e geométricas no cálculo das curvas de fragilidade, sem que seja necessário a criação de complexos modelos numéricos ou a utilização de análises recorrendo ao método dos elementos finitos [Silva *et al.*, 2012\_b]. Nesta metodologia, centenas de edifícios são gerados aleatoriamente através da simulação de Monte Carlo controlada,

seguindo as distribuições probabilísticas das características materiais e geométricas. Para cada edifício gerado, são calculados três deslocamentos do topo da estrutura, correspondendo cada um deles a um estado limite de dano. Este cálculo é realizado recorrendo a fórmulas simplificadas, tal como descrito em Crowley *et al.* [2004]. De seguida, o deslocamento do topo da estrutura causado devido à ação de sismos é calculado para um grande número de acelerogramas. Os deslocamentos impostos por cada acelerograma são comparados com os deslocamentos calculados anteriormente para cada estado limite de dano, de forma a alocar cada edifício em um estado de dano. Através da análise da percentagem de edifícios em cada estado de dano para cada acelerograma é possível extrair-se curvas de fragilidade, tal como ilustrado na Figura 21 para edifícios de betão armado, de altura média construídos antes de 1983 (RC\_MR\_LC). Neste trabalho foram assumidos quatro estados de dano: ligeiro, moderado, extenso e colapso, que são delimitados por três estados limites (EL) designados por 1, 2 e 3.

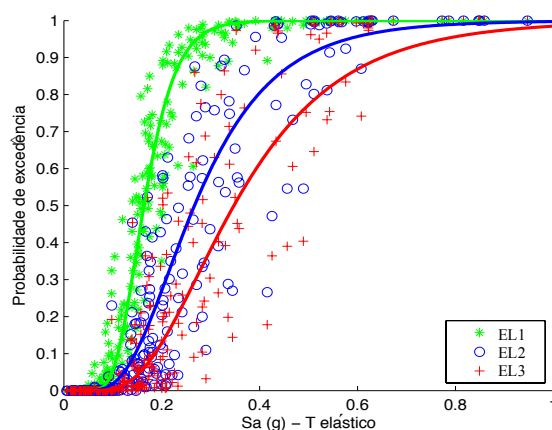


Figura 21 - Curvas de fragilidade para a classe de edifícios RC\_MR\_LC

Cada curva de fragilidade é modelada através de uma distribuição cumulativa logarítmica, sendo definida por uma média ( $\mu$ ), um desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de correlação ( $R$ ). Os resultados para cada uma das seis classes encontram-se descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados das curvas de fragilidade para as classes de betão armado

Tipologia	Estado limite 1			Estado limite 2			Estado limite 3		
	$\mu$	$\sigma$	$R$	$\mu$	$\sigma$	$R$	$\mu$	$\sigma$	$R$
RC_LR_LC	-0,561	0,596	0,944	-0,142	0,572	0,891	-0,073	0,566	0,877
RC_MR_LC	-1,826	0,388	0,975	-1,263	0,486	0,932	-1,156	0,502	0,921
RC_HR_LC	-2,362	0,360	0,990	-1,651	0,427	0,887	-1,537	0,472	0,873
RC_LR_HC	0,012	0,578	0,931	0,898	0,809	0,684	0,978	0,839	0,667
RC_MR_HC	-1,131	0,310	0,974	-0,057	0,536	0,735	0,001	0,555	0,716
RC_HR_HC	-1,648	0,264	0,983	-0,628	0,495	0,836	-0,546	0,536	0,820

Esta metodologia encontra-se detalhadamente descrita em Silva *et al.* [2012\_b] e o código para o cálculo das curvas de fragilidade encontra-se disponível num repositório público em GitHub [12].

## 4.2. Determinação das curvas de vulnerabilidade

Para o cálculo das perdas económicas é necessário converter as curvas de fragilidade (probabilidade de excedência de um número de estados limites de dano para um intervalo de intensidades sísmicas) em curvas de vulnerabilidade (distribuição de percentagens de perda para um intervalo de intensidades sísmicas). Para tal, combinou-se funções de consequência (percentagem de perda para cada estado limite de dano) com as curvas de fragilidade para cada classe construtivas. Neste processo, para cada intensidade sísmica, a percentagem de perda é o somatório do produto entre a percentagem de edifícios em cada estado de dano e a correspondente percentagem de perda, como representado na equação 2:

$$\%_{perda}|intensidade = \sum_{i=1}^{n^{\circ}danos} \%_{edifícios\ com\ danos_i}|intensidade \times \%_{perda\ |dano_i} \quad (2)$$

Relativamente às funções de consequência usadas neste estudo, não existem atualmente estudos especificamente para edifícios portugueses, pelo que foi necessário considerar trabalhos realizados para outros países, nomeadamente Itália [Pasquale e Goretti, 2001], Grécia [Kappos *et al.*, 2006], Turquia [Bal *et al.*, 2008] e Estados Unidos [USA, 2003]. A função de consequência final usada para cada uma das 14 classes construtivas foi o resultado da ponderação entre os quatro modelos suprarreferidos.

## 4.3. Resultados

Apenas para os edifícios de betão armado foram desenvolvidas curvas de fragilidade, tendo-se para as outras tipologias recorrido à literatura. Na Figura 22 encontram-se representadas os resultados finais das curvas de vulnerabilidade para as tipologias em betão armado.

Como se verifica, a vulnerabilidade está diretamente ligada às propriedades da construção, esta diminui com a evolução do código de construção, pois este tem sofrido várias evoluções ao longo dos anos que vêm melhorando o comportamento dos edifícios a eventos sísmicos.

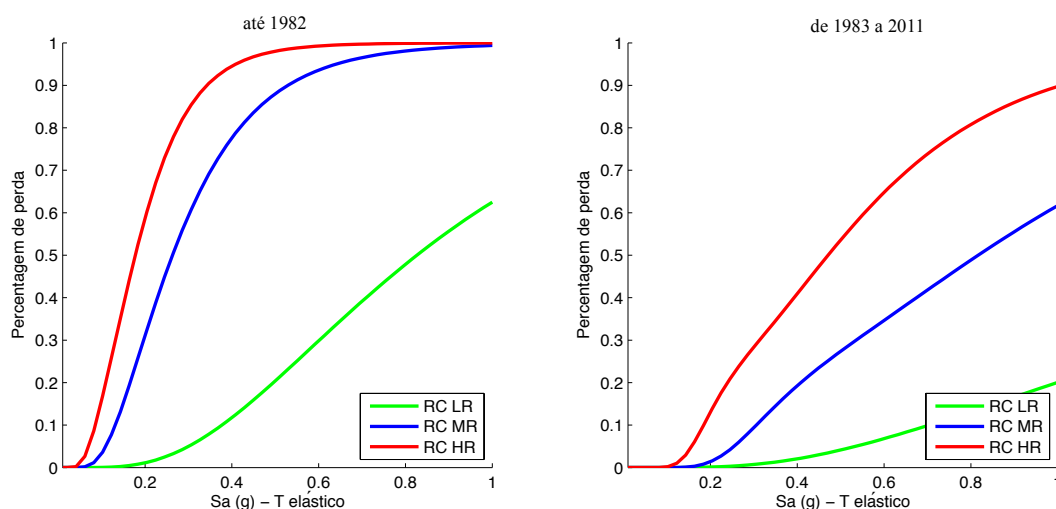


Figura 22 - Curvas de vulnerabilidade para estruturas em betão armado

No que diz respeito às restantes tipologias construtivas, a Tabela 11 apresenta um sumário dos trabalhos selecionados para a representação da vulnerabilidade de cada uma.

Tabela 11 - Modelos de fragilidade considerados para ACP, ASP, A, TP e RS

Paredes de alvenaria argamassada com placa (ACP)	Paredes de alvenaria argamassada sem placa (ASP)	Paredes de Adobe (A)	Paredes de Taipa (TP)	Paredes de Pedra Solta (RS)
UPAT [2011]	UPAT [2011]	LESSLOSS [2005]	LESSLOSS [2005]	Borzi <i>et al.</i> [2008]

É importante referir que relativamente às estruturas com paredes em Taipa (TP), apesar de ser uma técnica construtiva usada há séculos em vários países no mundo, não foi encontrada nenhuma informação quanto ao seu comportamento sísmico, pelo que não foi possível selecionar-se um modelo de fragilidade adequado. Dado isto, decidiu-se aplicar-se o modelo de fragilidade usado para as estruturas em adobe. Esta aproximação introduz claramente incertezas nos resultados e revela uma área que necessita de investigação adicional. No entanto, é importante referir que esta classe construtiva representa uma porção bastante pequena do Parque Habitacional Português, não influenciando assim consideravelmente os resultados finais à escala nacional.



## 5. AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO

O risco sísmico refere-se à probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas absolutas em consequência da ocorrência de um evento sísmico na região e num período de tempo de exposição especificado, sendo uma função da perigosidade, da vulnerabilidade e do valor dos elementos em risco (exposição) [Sousa, 2006].

Depois de determinados os modelos de perigosidade, exposição e vulnerabilidade considerados para este trabalho, pretende-se agora usar um software opensource para o cálculo do risco sísmico, denominado OpenQuake [1]. Esta ferramenta é desenvolvida pelo Global Earthquake Model (GEM) [11], encontra-se presentemente na versão 0.7.1 e pode ser descarregado e utilizado gratuitamente. OpenQuake tem a capacidade de calcular tanto perigosidade como risco sísmico, e de permitir que os modelos de perigosidade, vulnerabilidade e de exposição sejam estabelecidos pelo utilizador. O facto do seu desenvolvimento seguir uma filosofia de total abertura e transparência, tem a vantagem de permitir que os utilizadores verifiquem o seu código, facilitando assim a compreensão da forma como os cálculos são realizados. As metodologias e fórmulas implementadas no OpenQuake encontram-se descritas detalhadamente em Crowley *et al.* [2011].

O software OpenQuake encontra-se em constante desenvolvimento, pelo que o número de funcionalidades tende a aumentar a cada versão, mas atualmente é composto por quatro calculadores: calculador determinístico de risco, calculador probabilístico de risco, calculador clássico de risco e calculador de desagregação de perigosidade. Contudo dos quatro, apenas um foi usado no decorrer deste trabalho, o calculador clássico de risco que será usado para estimar as perdas devido a todos os possíveis eventos que podem ocorrer durante um determinado período de tempo. Este calculador usa a teoria clássica de análise probabilística de perigosidade sísmica proposta por Cornell [1968] e McGuire [1976] para a determinação de curvas e mapas de perigosidade sísmica ou curvas de perda. Estes resultados podem ser usados para a comparação do potencial de perda entre tipologias de edifícios distintas ou situados em locais diferentes.

### 5.1. Curvas de perdas económicas

As curvas de perdas económicas são a forma mais simples de apresentar as perdas de um local exato, sendo que quando se trata de um estudo de grande escala com esta de apresentação torna-se impossível de cobrir todo o território e aí são usados mapas de distribuição como será

apresentado mais à frente. Neste trabalho teve-se especial atenção a quatro das principais cidades de Portugal, sendo elas Faro, Lisboa, Aveiro e Porto, para as quais são apresentadas e comparadas na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 as suas curvas de perda económica para um intervalo de tempo de 50 anos. Como é possível averiguar, avaliando as perdas existentes com o valor económico de cada região, as maiores percentagens de perdas situam-se em Lisboa e Faro, sendo que Aveiro e Porto apresentam valores menores. Uma nota importante de registar é o facto de o Porto apresentar perdas ligeiramente superiores a Aveiro, sendo que então o risco sísmico não é tão linear como ser decrescente do sul para o norte, mas que apresenta uma descontinuidade neste decréscimo no centro do país.

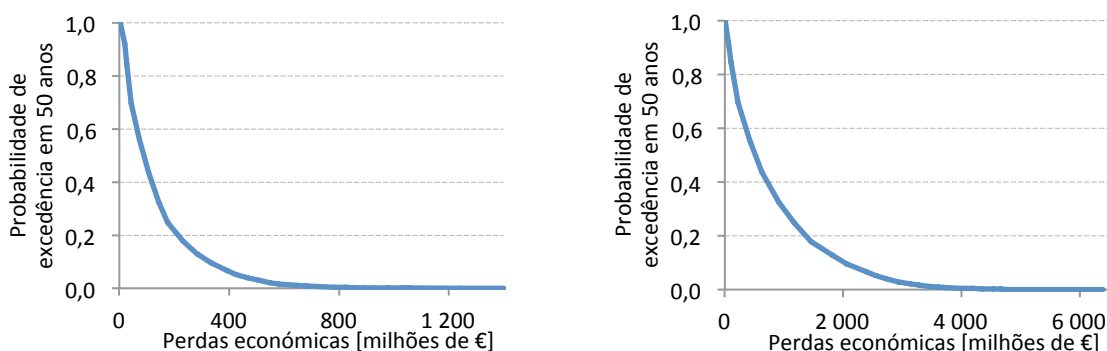


Figura 23 - Curvas de perda económica para Faro (esquerda) e Lisboa (direita)

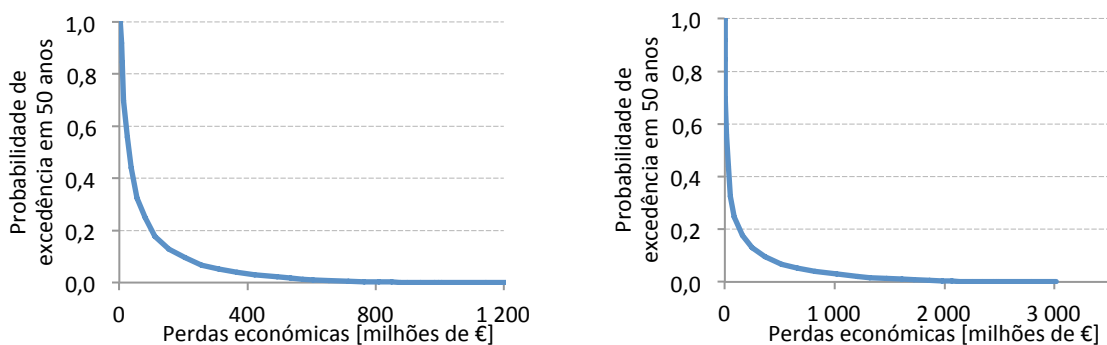


Figura 24 - Curvas de perda económica para Aveiro (esquerda) e Porto (direita)

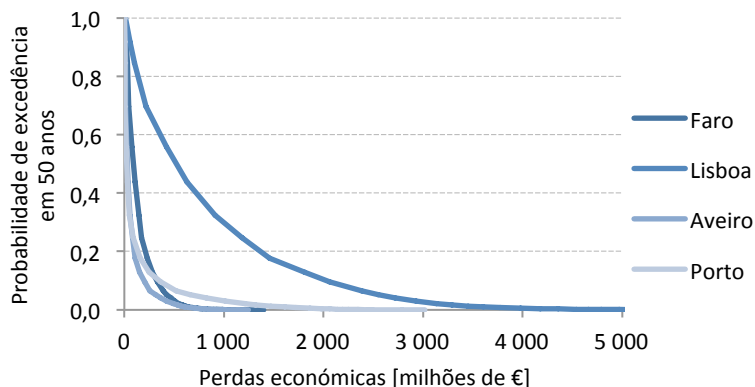


Figura 25 - Comparação das curvas de perda económica

Como foi referido anteriormente, este modelo de apresentação não é o mais correto para apresentar o risco de área muito vasta. Então existe a necessidade de se apresentar esta informação de uma forma mais simplificada como num mapa de distribuição. Isso consegue-se apresentando os valores simplesmente para um valor de excedência, que neste caso se usou 10%. Ao se extrapolar para os vários pontos de estudo, que neste caso são os 278 concelhos de Portugal, e para uma dada tipologia o valor de perda económica para 10% de excedência em 50 anos obteve-se a distribuição de perdas para Portugal para essa tipologia. Fazendo a soma das perdas de todas as tipologias consideradas para cada um dos concelhos chegou-se então aos mapas de perdas económicas totais que são apresentados em seguida.

## 5.2. Mapas de perdas económicas

Quando se avalia uma vasta área, neste caso Portugal, a apresentação dos resultados através de curvas não é viável, recorrendo-se então a mapas. Então de forma a demonstrar estes valores distribuídos geograficamente, são apresentados na Figura 26 e Figura 27 os mapas de Portugal com as perdas económicas relativas que, com vista a simplificar a sua apresentação, para cada um dos concelhos do país foram agregados os valores das perdas económicas de todas as categorias existentes em cada uma das 4 tipologias construtivas consideradas.

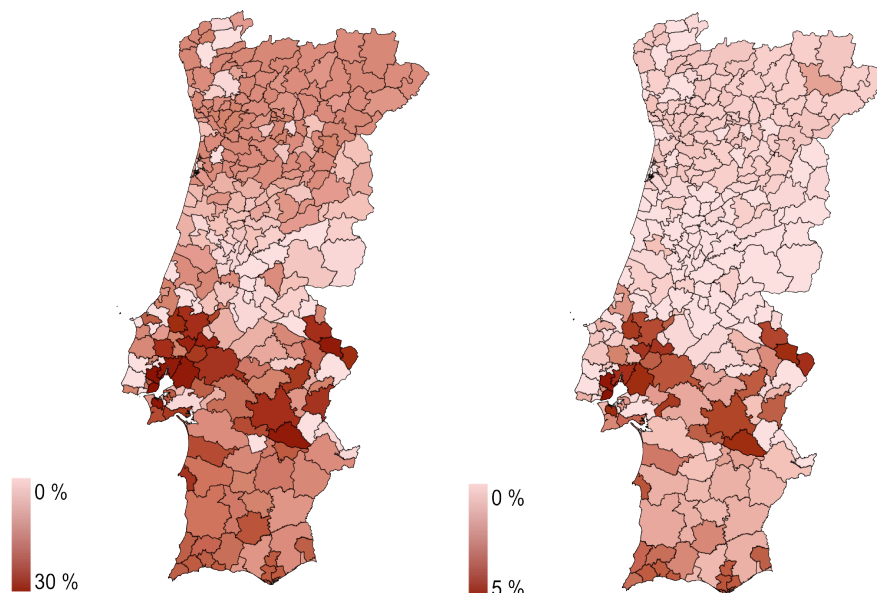


Figura 26 - Mapa de perdas económicas relativas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos para betão armado (esquerda) e alvenaria argamassada com placa (direita)

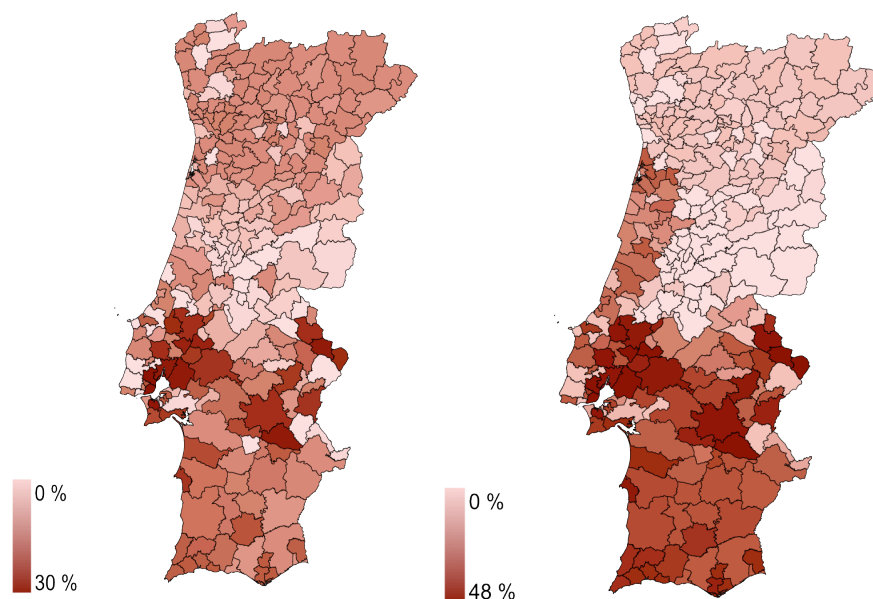


Figura 27 - Mapa de perdas económicas relativas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos para alvenaria argamassada sem placa (esquerda) e alvenaria de taipa, adobe e pedra solta (direita)

### 5.3. Desagregação de perdas

Ao calcular o risco sísmico para Portugal para uma probabilidade de excedência de 10% com um período de retorno de 50 anos chegou-se a um valor de perdas económicas para o país de cada uma das categorias construtivas consideradas, como se apresenta na Figura 28. De forma a se perceber melhor de que tipologias construtivas provêm as maiores perdas, na Figura 29 é apresentado para cada categoria construtiva a sua percentagem de perdas para o cenário considerado.

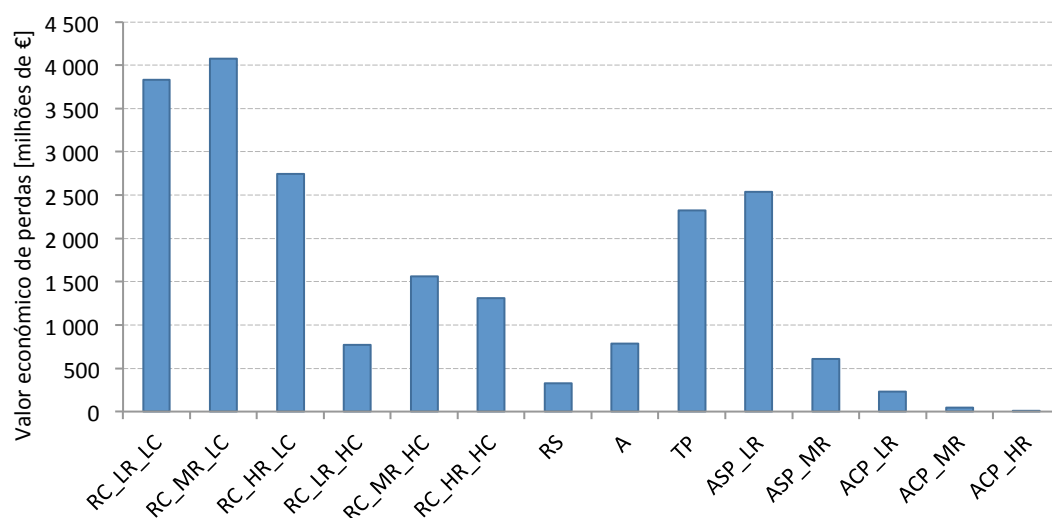


Figura 28 - Valor económico de perdas por categoria construtiva para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos

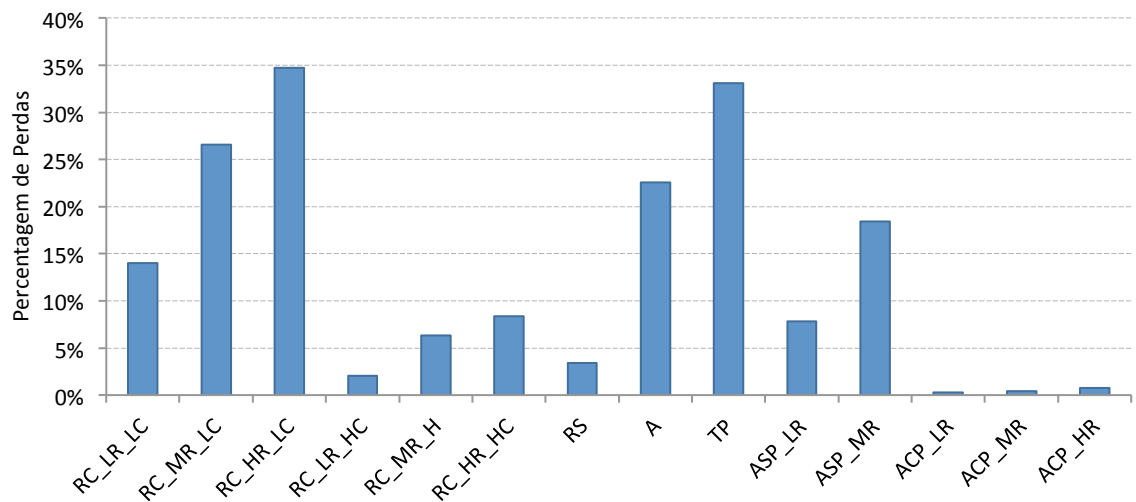


Figura 29 - Percentagem de perdas económicas por categoria construtiva para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos

Como é possível verificar, na tipologia de betão armado, tal como seria de esperar, as construções mais antigas são as que apresentam maiores percentagens de perda. As tipologias construtivas de paredes de taipa e de adobe apresentam também valores elevados de perdas enquanto que a tipologia de alvenaria de pedra solta apresenta valores um pouco baixos para o que seria de esperar. O mesmo acontece para a tipologia de paredes de alvenaria argamassada com placa, que se verificam valores muito reduzidos, pelo que se conclui que as curvas de vulnerabilidade consideradas para esta tipologia não se adequam totalmente à realidade.



## 6. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

### 6.1. Conclusões

Tal como referido anteriormente, o risco sísmico é uma função de três variáveis, a perigosidade, a exposição e a vulnerabilidade. Como tal, caso num dado local uma das três componentes tender para zero, o risco sísmico também acompanhará essa tendência. Desta forma é importante conseguir relacionar bem estes três factores.

No capítulo 2, onde se estudou a perigosidade sísmica, após a análise de 32 combinações possíveis definidas no modelo verificou-se que a que mais se aproximava da mediana, fruto da análise de todas as combinações, é a combinação SA\_CA\_RB com as leis de atenuação Toro [2002] para CCE e Campbell e Bozorgnia [2008] para CAS. Na Figura 4, onde é apresentada a mediana da perigosidade, é perceptível que os valores mais elevados se encontram na zona de Lisboa e no Sul de Portugal, sendo mais reduzida no norte e centro do país. A comparação de estudos de perigosidade não é uma tarefa trivial devido aos vários parâmetros que influenciam os resultados, no entanto, foi possível reproduzir resultados semelhantes ao modelo original considerado, o modelo Vilanova e Fonseca [2007], e comparou-se, como se pode observar na Figura 30, com resultados de outros autores como Montilla e Cansado [2002] e RSA [1983] e concluiu-se que os resultados obtidos são perfeitamente plausíveis e realistas. É importante ainda registar que, tal como em Vilanova e Fonseca [2007], no centro interior de Portugal verifica-se uma perigosidade menor que no norte. Este facto contraria o RSA [1983], que apresenta um decréscimo contínuo de sudoeste para o nordeste de Portugal. Em geral, os estudos baseados em dados de intensidade, como RSA [1983], Sousa [1996] e Pelaez e Casado [2002], apresentam valores mais elevados no extremo sudoeste enquanto que os estudos baseados na aceleração do solo (PGA), como Jiménez e García-Fernández [1999] apresentam valores mais elevados de perigosidade sísmica na zona de Lisboa e no Algarve.

Já no capítulo 3 onde se desenvolveu o modelo de exposição, apesar das simplificações e aproximações que foram necessário seguir-se, estimou-se uma distribuição do valor económico do edificado por concelho. Os resultados para o valor agregado (soma do valor económico de todas as tipologias construtivas), é apresentado na Figura 31.

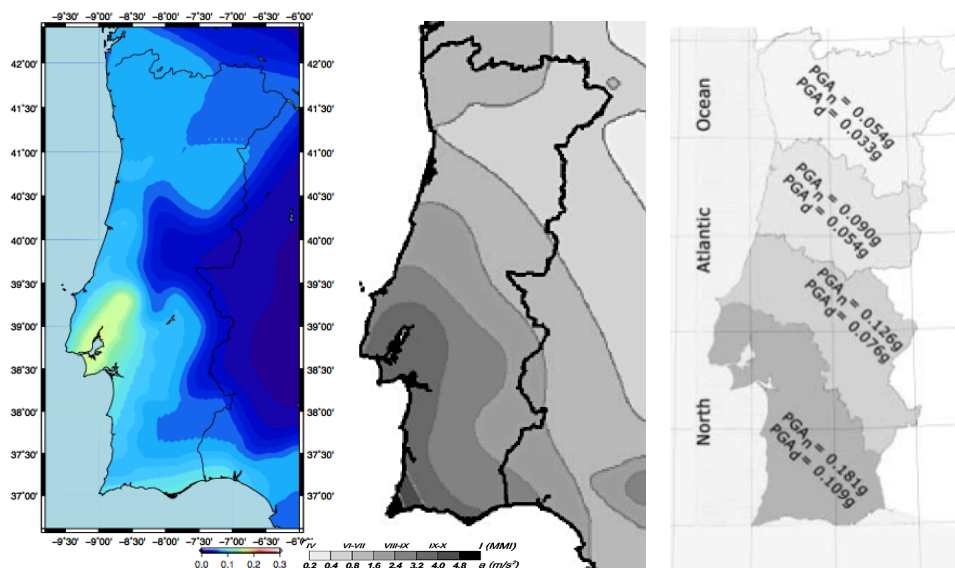


Figura 30 – Mapa de perigosidade obtido, de Montilla e Cansado [2002] e do RSA [1983], respetivamente

É notório que onde se apresentam valores mais elevados é na zona litoral do país. Neste capítulo levou-se também a cabo uma recolha de informação das propriedades geométricas de edifícios de betão armado que permitem caracterizar o edificado existente desta categoria. Estes dados poderão ainda no futuro servir para novos estudos onde seja necessário a caracterização de estruturas de betão armado.

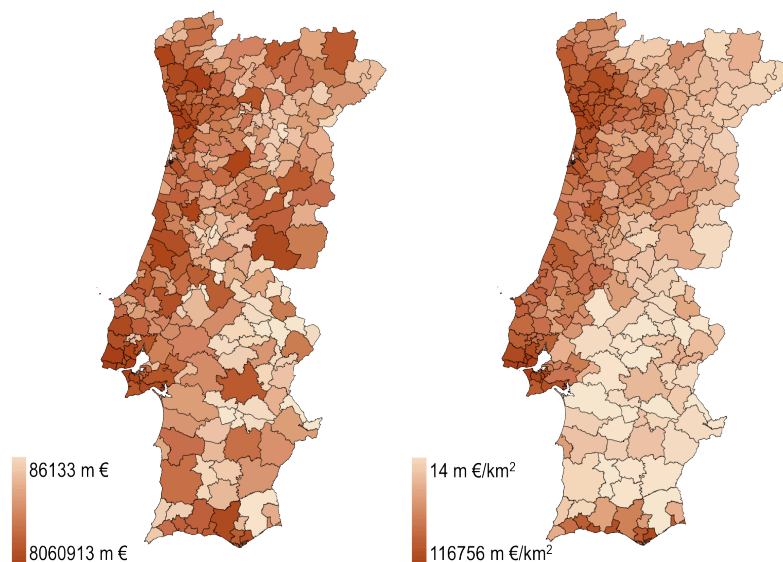


Figura 31 - Distribuição do valor económico (em milhares de euros) total do edificado (esquerda) e mapa de densidade do valor económico (direita)

Quanto à vulnerabilidade, desenvolvida no capítulo 4, foram tomadas duas decisões distintas na escolha dos modelos. Para as estruturas em betão armado, foram usados os dados



recolhidos das propriedades geométricas do edificado desta tipologia para o desenvolvimento de curvas de vulnerabilidade. Quanto às restantes tipologias foram usados modelos existentes na literatura. Alguns destes modelos considerados, conforme já foi dito anteriormente, revelaram-se pouco realistas pois, como é possível verificar na Figura 29, os edifícios de alvenaria argamassada com placa (ACP) e os edifícios de alvenaria de pedra solta (RS) apresentam percentagens de perda reduzidas para o que seria de esperar. Estes valores são parcialmente justificado por estas tipologias se encontrar distribuídas sobretudo no norte de Portugal, contudo as curvas consideradas representam tipologias demasiado resistentes.

Finalmente, no capítulo 5, é calculado o risco sísmico para Portugal, considerando o que foi apresentado nos capítulos anteriores, chegando assim às perdas económicas para o país, como é apresentado de seguida. As perdas económicas totais absolutas de Portugal por concelho são apresentadas na Figura 32 à esquerda, enquanto que à direita se apresentam as perdas totais relativas. Para obter estes resultados, foram agregados os valores das quatro tipologias consideradas em cada um dos concelhos.

Como é possível verificar as maiores perdas encontram-se principalmente no sul de Portugal e na zona de Lisboa, decrescendo para o norte do país. Conforme já foi referido anteriormente, verifica-se na zona centro do país menores perdas absolutas que no sul do país.

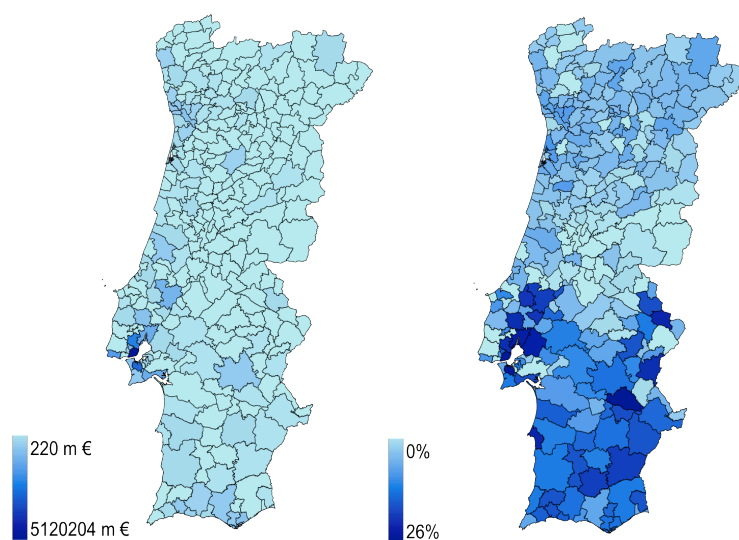


Figura 32 - Mapa de perdas económicas (em milhares de euros) totais absolutas (esquerda) e relativas (direita) para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos

Comparando os resultados com os do trabalho de Sousa [2006], que apresenta valores de perdas económicas na ordem de 10 a 20%, o que tendo em consideração todas as incertezas envolvidas neste estudo pode-se concluir que os valores obtidos são aceitáveis.

## 6.2. Desenvolvimentos futuros

De modo a se conseguir obter resultados cada vez mais preciso e rigorosos existem alguns pontos deste trabalho que poderão ser alvo de um estudo mais detalhado. De forma a diluir algumas destas lacunas será necessário realizar algumas tarefas posteriormente, tais como:

- Usar uma base de dados mais extensa para a determinação das propriedades geométricas dos edifícios, sendo necessário a recolha de informação de um maior número de projetos;
- Tomar em conta os efeitos locais na perigosidade que surgem com a mudança do solo de fundação, sendo que este factor pode implicar importantes variações no comportamento das ondas de vibração, atenuando ou ampliando a sua frequência;
- Analisar o risco sísmico para os dados de 2001 de modo análogo ao procedido tomado para os dados de 2011 de maneira a que seja possível a sua comparação para se verificar como tem o risco evoluído ao longo dos anos;
- Proceder desenvolvimento de um modelo de vulnerabilidade recorrendo a espectros de aceleração espectral, que demonstrem com maior fidelidade o comportamento das estruturas, pois os espectros usados além de se encontrarem segundo a aceleração máxima do solo (PGA), porque as curvas recolhidas na literatura encontra-se em PGA, para a aceleração espectral seria necessário considerar vários períodos de vibração e o software openquake permite apenas a utilização de um período por análise;
- Verificar os resultados da metodologia utilizada na obtenção das curvas de vulnerabilidade Silva *et al.* [2012\_c] com outros métodos mais complexos, como o caso da análise dinâmica não linear, pois trata-se de uma metodologia simplificada.

## 7. REFERÊNCIAS

### 7.1. Referências bibliográficas

- ABRAHAMSON, N. A. e SILVA, W. J. 1996. Empirical ground motion models. Brookhaven National Laboratory.
- AKKAR, S. e BOMMER, J. J. 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81, 195 - 206.
- ALBARELLO, D., CAMASSI, R. e REBEZ, A. 2001. Detection of space and time heterogeneity in the completeness of a seismic catalog by a statistical approach: an application to the Italian area. *Bulletin of the Seismological of America*, 91, 1694 - 1703.
- AZEVEDO, J., GUERREIRO, L., BENTO, R., LOPES, M. e PROENÇA, J. 2009. Seismic vulnerability of lifelines in the greater Lisbon area. *Bull Earthquake Engineering*, 8, 157-180.
- BAL, I. E., CROWLEY, H., PINHO, R. e GULAY, F. G. 2008. Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 914 - 932.
- BOMMER, J. J. e SCHERBAUM, F. 2008. The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. *Earthquake Spectra*, 42, 997 - 1009.
- BOMMER, J. J., STAFFORD, P. J. e ALARCN, J. E. 2009. Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed and uniform duration of earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological of America*, 99.
- BOORE, D. M. e ATKINSON, G. M. 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5%- Damped PSA at spetral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 99 - 138.
- BORZI, B., CROWLEY, H. e PINHO, R. 2008. Simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) method for masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 2 : 4, 353 - 376.
- CAMPBELL, K. W. 2003. Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological of America*, 93, 1012 - 1033.
- CAMPBELL, K. W. e BOZORGNI, Y. 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component og PGA, PGV, PGD and 5 ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24 (1), 139 - 171.
- CAMPOS-COSTA, A., SOUSA, M. L., CARVALHO, A. e COELHO, E. 2006. Seismic loss scenarios based on hazard disaggregation. Application to the metropolitan region of Lisboa, Portugal. *Assessing and Managing Earthquake Risk*, 449 - 462.

- CARVALHO, E. C., COELHO, E., CAMPOS-COSTA, A., SOUSA, M. L. e CANDEIAS, P. 2001. Classificação tipológica do parque habitacional de Portugal Continental para o estudo da sua vulnerabilidade. LREC, Ponta Delgada.
- CHIOU, B. S.-J. e YOUNGS, R. R. 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 24, 173 - 215.
- CORNELL, C. A. 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. *Bulletin of the Seismological of America*, 58, 1583-1606.
- COSTA, S. M. S. 2008. Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque edificado da avenida Dr. Lourenço Peixinho - Aveiro. Tese de Mestrado da FEUP, Porto.
- CROWLEY, H., PINHO, R. e BOMMER, J. 2004. A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2, 173 - 219.
- CROWLEY, H., SILVA, V., MONELLI, D., PAGANI, M. e WEATHERILL, G. 2011. *OpenQuake Book*. The GEM Foundation, Itália.
- FERREIRA, C. F. 2008. Vulnerabilidade sísmica do parque edificado na cidade de Aveiro. Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- FERREIRA, M. A., PROENÇA, J. M. e OLIVEIRA, C. S. 2010. Avaliação do risco sísmico nos equipamentos de ensino da região do Algarve. *Sísmica 2010 - 8º congresso de sismologia e engenharia sísmica*.
- GIARDINI, D. 1999. The global seismic hazard assessment program (GSHAP). *Annali di Geofisica*, 42, 957 - 974.
- GRÜNTAL, G. 1998. European macroseismic scale 1998 (EMS-98). *Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*.
- INE 2002. CENSOS 2001 - Resultados definitivos.
- INE 2010. Estatísticas da construção e habitação 2009.
- INE 2011. CENSOS 2011 - Resultados Provisórios.
- JAISWAL, K., WALD, D. e PORTER, K. 2010. A global building inventory for earthquake loss estimation and risk management. *Earthquake Spectra*, 26, 731-748.
- JIMÉNEZ, M.-J. e GARCÍA-FERNÁNDEZ, M. 1999. Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region. *Annali di Geofisica*, 42, 1057 - 1065.
- KAPPOS, A., PANAGOPOULOS, G., PANAGIOTOPOULOS, C. e PENELIS, G. 2006. A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4 (4), 391 - 413.
- KEMPTON, J. J. e STEWART, J. P. 2006. Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects. *Earthquake Spectra*, 22, 985 - 1013.

- LESSLOSS 2005. Report on building stock data and vulnerability data for each case study. Relatório 84.
- MARTINS, J. D. C. M. 2011. Avaliação da segurança sísmica das construções - Método japonês. Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- MCGUIRE, K. K. 1976. Fortran computer program for seismic risk analysis. Open-File report 76-67, United States Department of the Interior, Geological Survey.
- MONTILLA, J. A. P. e CASADO, C. L. 2002. Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics*, 159, 2699 - 2713.
- MOUROUX, P. e BRUN, B. T. L. 2006. Presentation of RISK-UE Project. *Bull Earthquake Engineering*, 4, 323–339.
- PASQUALE, G. D. e GORETTI, A. 2001. Vulnerabilità funzionale ed economica degli edifici residenziali colpiti dai recenti eventi sismici italiani. Proceedings of the 10th national conference “L’ingegneria Sismica in Italia”, Potenza-Matera, Italy.
- PELAEZ, J. e CASADO, C. L. 2002. Seismic hazard estimate at the Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics*, 159, 2699 - 2713.
- PINHO, R. 2010. The global earthquake model: calculating and communicating seismic risk. The GEM Foundation, Itália.
- PRB 2010. 2010 world population data sheet. Population Reference Bureau, Washington, USA.
- RODRIGUES, L. C. D. S. 2009. Metodologias simplificadas de avaliação sísmica de edifícios de betão armado. Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- ROSSETTO, T. e ELNASHAI, A. 2005. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering Structures*, 27 (3), 297 - 409.
- RSA 1983. Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes. Decreto-Lei nº235/83 de 31 de Maio e Decreto-Lei nº 357/85 de 2 de Setembro. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1986. Lisboa.
- SILVA, V., CROWLEY, H., PINHO, R., VARUM, H. e SOUSA, R. 2012\_a. Evaluation of analytical methodologies to derive vulnerability functions. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- SILVA, V., CROWLEY, H., PINHO, R. e VARUM, H. 2012\_b. Extending displacement-based earthquake loss assessment (DBELA) for the computation of fragility curves. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- SILVA, V., CROWLEY, H., PAGANI, M., MONELLI, D. e PINHO, R. 2012\_c. Development and application of OpenQuake, an opensource seismic risk assessment software. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, in press.

- SOUSA, M. L. 1996. Modelos probabilistas para avaliação a casualidade sísmica em Portugal Continental. Tese de Mestrado da Instituto Superior Técnico, Lisboa,
- SOUSA, M. L. 2006. Risco sísmico em Portugal Continental. Tese de Doutoramento da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- SOUSA, M. L., COELHO, E. e MARTINS, A. 2010. Vulnerabilidade sísmica e danos no parque hoteleiro da região do Algarve. Sismica 2010 - 8º congresso de sismologia e engenharia sísmica.
- SOUSA, M. L., MARTINS, A. e COSTA, A. C. 2003. Levantamento do parque habitacional de Portugal Continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica com base nos Censos 2001. Relatório 205/03, NESDE, LNEC.
- SPENCE, R. 2004. Risk and regulation: can improved government action reduce the impacts of natural disasters? Building Research & Information, 32, 391-402.
- SPENCE, R. 2007. Earthquake disaster scenario prediction and loss modelling for urban areas. LESSLOSS Report - 2007/07, IUSS press, Pavia, Itália.
- STAFFORD, P. J., BERRIL, J. B. e PETTINGA, J. R. 2009. New predictive equations for Arias Intensity from crustal earthquakes in New Zealand. Journal of Seismology, 13, 31 - 52.
- STEPP, J. C. 1972. Analysis of completeness in the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of seismic hazard. Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Applications, 2, 1897 - 1910.
- TORO, G. R. 2002. Modification of the Toro et al. (1997) attenuation equations for large magnitudes and short distances.
- UPAT 2011. Fragility functions for masonry building. Deliverable, University of Patras, Greece.
- USA, 2003. FEMA-443. HAZUS-MH technical manual. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- VICENTE, R. S. 2008. Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Tese de Doutoramento da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- VILANOVA, S. P. e FONSECA, J. F. B. D. 2007. Probabilistic seismic-hazard assessment for Portugal. Bulletin of the Seismological of America, 97, 1702 - 1717.

## **7.2. Referências webgráficas**

1. OpenQuake. Disponível em: <http://www.openquake.org> [Consultado a 16/10/2011].
2. SHARE. Disponível em: <http://www.share-eu.org> [Consultado a 22/10/2011].
3. SYNER-G. Disponível em: <http://www.vce.at/SYNER-G> [Consultado a 10/11/2011].

4. NERA. Disponível em: <http://www.nera-eu.org> [Consultado a 3/11/2011].
5. LNEC. Disponível em: <http://www.ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE> [Consultado a 3/11/2011].
6. Instituto Português de Meteorologia. Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/sismologia> [Consultado a 10/11/2011].
7. Instituto Geográfico Nacional. Disponível em: <http://www.ign.es/> [Consultado a 13/02/2012].
8. International Seismological Centre. Disponível em: <http://www.isc.ac.uk/> [Consultado a 16/10/2011].
9. AHEAD. Disponível em: <http://emidius.eu/AHEAD/> [Consultado a 28/10/2011].
10. Instituto Nacional de Estatística. Disponível em: <http://www.ine.pt> [Consultado a 16/02/2011].
11. Global Earthquake Model. Disponível em: <http://www.globalquakemodel.org> [Consultado a 3/11/2011].
12. Github public repository. Disponível em: <https://github.com/VSilva/DBELA/> [Consultado a 16/02/2012].